

PHYSIQUE CHIMIE

Tle

Programme 2020

Enseignement de spécialité

Collection ESPACE



Avec Bordas FlashPage, votre manuel est augmenté
Voir au dos

bordas éditeur

Les clés du BAC

L'épreuve de spécialité de Physique-Chimie

A L'épreuve écrite ..... page II

B L'épreuve pratique (ECE) ..... page III

1. Déroulé de l'épreuve
2. Les compétences évaluées

Se préparer au Grand oral

A Le Grand oral : qu'est-ce que c'est ? ..... page IV

B Préparer son projet et organiser ses idées ..... page V

1. Choisir une question et la débroussailler
2. Organiser son temps et orienter ses recherches

C Structurer son discours ..... page VIII

1. Construire un plan pertinent
2. Formuler une accroche percutante
3. Soigner son discours
4. Travailler sa conclusion

D Préparer sa prise de parole ..... page X

1. Quelle est mon expérience de l'oral ?
2. Apprendre à gérer son temps
3. Mémoriser son discours
4. Travailler sur son apparence et sa posture

E Se préparer à l'entretien avec le jury ..... page XIV

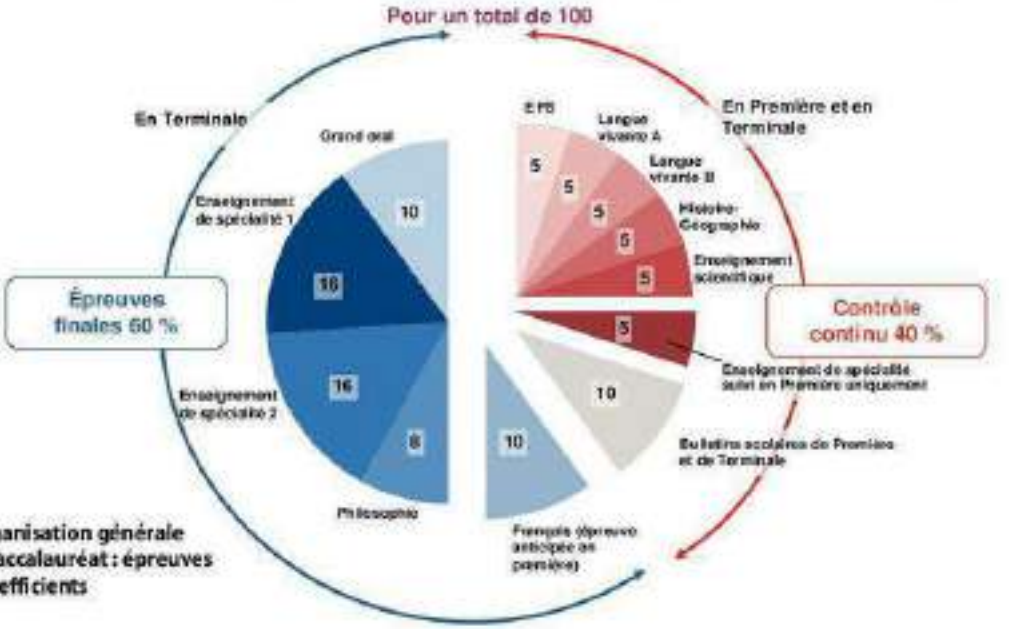
1. Préparer un support pour le jury
2. Distinguer les différents types de questions du jury
3. Justifier ses choix d'orientation

F Grille d'évaluation indicative du Grand oral ..... page XVI

bordas éditeur

L'épreuve de spécialité de Physique-Chimie

L'épreuve de spécialité de Physique-Chimie compte pour 16 % de la note finale du baccalauréat.



L'organisation générale du baccalauréat : épreuves et coefficients

Cette épreuve est notée sur 20 points.
Elle est composée d'une épreuve écrite (16 points) et d'une épreuve pratique (4 points).

A L'épreuve écrite

L'épreuve écrite a lieu fin mars et dure 3h30.

Elle comporte trois exercices indépendants et s'appuie de manière équilibrée sur différents thèmes des programmes. Les sujets peuvent contenir des documents et inclure des questions relatives aux aspects expérimentaux de la discipline et aux capacités numériques identifiées dans les programmes.

Le sujet précise si l'usage de la calculatrice est autorisé.

De nombreuses pages du manuel permettent de se préparer à cette épreuve écrite tout au long de l'année.
→ Rendez-vous page 2 du manuel.

Le jour J

N'oublie pas d'emmener ta convocation, ta calculatrice (avec des piles neuves), à boire, à grignoter et une montre !

À la date de publication de ce manuel, les notions suivantes sont exclues de l'épreuve écrite :

- Modélisation microscopique (chapitre 4, p. 95 et 96 du manuel)
- Modéliser l'évolution temporelle d'un système, siège d'une transformation nucléaire (chapitre 5, p. 112 à 135 du manuel)
- Forcer le sens d'évolution d'un système (chapitre 8, p. 186 à 207 du manuel)
- Modéliser l'écoulement d'un fluide (chapitre 14, p. 340 à 363 du manuel)
- Décrire la lumière par un flux de photons (chapitre 19, p. 476 à 497 du manuel)

L'évaluation portant sur ces notions sera intégrée dans la note figurant sur les bulletins scolaires, prise en compte au baccalauréat. Il est aussi possible d'être interrogé sur ces notions lors du Grand oral ou lors de l'épreuve orale de contrôle (rattrapage).

B L'épreuve pratique (ECE)

1. Déroulé de l'épreuve

Cette évaluation a pour objectif d'évaluer la maîtrise de compétences expérimentales qui mobilisent des connaissances, des capacités expérimentales et des attitudes nécessaires à la fois à la compréhension, à l'élaboration et à la mise en œuvre d'un protocole expérimental.

Elle se déroule lors du 2e trimestre et dure 1 h.

De nombreuses pages du manuel permettent de se préparer à l'ECE tout au long de l'année.
→ Rendez-vous page 2 du manuel.

On trouve dans l'énoncé : une description du **contexte** de l'expérimentation, le **matériel mis à sa disposition** (il est possible que tout ne soit pas utile), des **documents** de nature différente et la présentation du **travail à effectuer**.

Afin que les gestes manipulatoires attendus puissent être observés par l'évaluateur, tu peux être amené(e) à devoir l'appeler au cours de l'épreuve. Cela est alors clairement signalé dans le sujet de l'épreuve.



Appeler le professeur pour valider le protocole et le mettre en œuvre devant lui.

Le jour J

À la fin de l'épreuve, n'oublie pas de défaire le montage et de ranger la paillasse avant de quitter la salle : c'est un attendu qui peut être évalué.

2. Les compétences évaluées

Les compétences évaluées sont les compétences associées à la démarche expérimentale en sciences :

Compétences	Exemples de capacités qui peuvent être attendues
APP S'approprier	• Rechercher, extraire et organiser l'information en lien avec la problématique étudiée
AN / RAI Analyser / Raisonner	• Choisir, concevoir ou justifier un protocole / dispositif expérimental
REA Réaliser	• Utiliser le matériel (dont l'outil informatique) de manière adaptée • Suivre un protocole en respectant les règles de sécurité • Organiser son poste de travail • Effectuer des mesures avec précision • Effectuer un calcul simple
VAL Valider	• Exploiter et interpréter des observations, des mesures • Analyser des résultats de façon critique
COM Communiquer	• Utiliser les notions et le vocabulaire scientifiques adaptés • Présenter, formuler une proposition, une argumentation, une synthèse, une conclusion de manière cohérente, complète et compréhensible

À la date de publication de ce manuel, les capacités expérimentales suivantes sont exclues de l'épreuve pratique :

- Réaliser une pile et un circuit électrique intégrant un électrolyseur (chapitre 6, voir p. 140, 141 et 158, et chapitre 8, p. 188, 190 et 206 du manuel)
- Utiliser un dispositif permettant d'étudier la poussée d'Archimède (chapitre 14, voir p. 362 du manuel)
- Mesurer une pression et une vitesse d'écoulement dans un gaz et dans un liquide (chapitre 4, voir p. 343 et 344 du manuel)
- Utiliser une cellule photovoltaïque (chapitre 19, voir p. 480 et 496 du manuel)

Se préparer au Grand oral

A Le Grand oral : qu'est-ce que c'est ?

L'épreuve du « Grand oral » est l'une des cinq épreuves terminales du baccalauréat et compte pour **10 % de la note finale**. Elle a lieu **à la fin de l'année de Terminale**.

Cette épreuve se démarque des autres car on **utilise les savoirs acquis dans ses enseignements de spécialité pour soutenir une prise de parole originale**. C'est l'occasion de montrer qu'on est capable de s'exprimer de façon claire et convaincante sur un sujet qui nous intéresse. Cette épreuve est donc très utile non seulement pour le bac, mais aussi parce qu'elle anticipe les attentes des études supérieures et de sa future vie professionnelle. Tes professeurs t'accompagneront dans la préparation de cet exercice que l'on peut choisir de travailler seul(e) ou avec des camarades.

Cette année, tu as choisi deux enseignements de spécialité : tu as travaillé avec ton professeur à partir de différents axes d'étude et tu as pu pressentir les multiples **enjeux** liés à ces matières. Le Grand oral permet d'approfondir une ou deux thématique(s) de ton choix, liées à ces deux spécialités, et qui ont éveillé ta curiosité lorsque tu as réfléchi à ton orientation : comme s'il te revenait de faire deux enquêtes dont on attend que tu délivres les résultats. Tu « prépares le terrain » de tes études supérieures et tu montres que tu t'es informé(e) sur telle ou telle perspective.

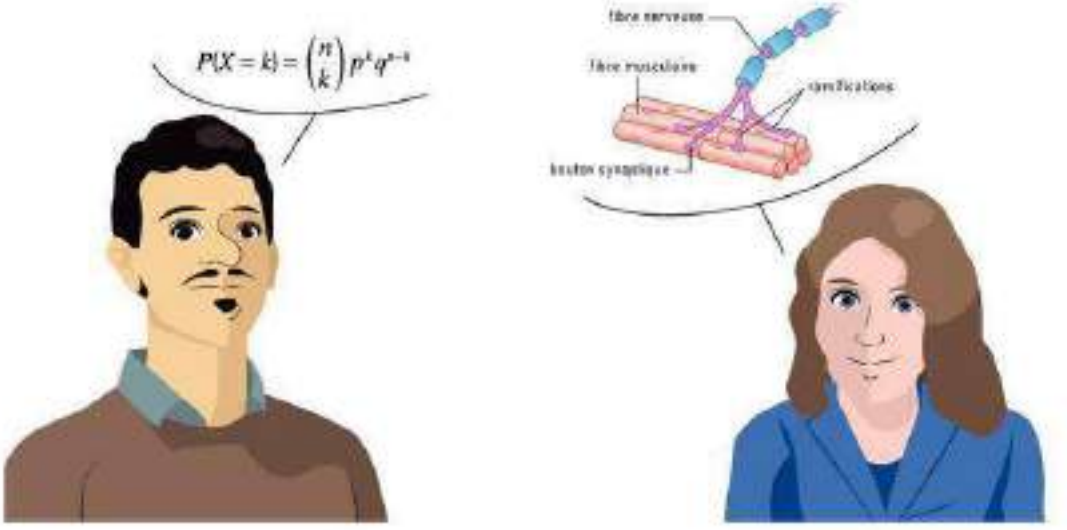
Le jour J, on présente au jury sa (ou ses deux) question(s) : **le jury en choisit une** et on doit s'exprimer durant **20 minutes** pour montrer la façon dont on s'est **personnellement investi pour y répondre.**

Le premier temps de l'épreuve consiste à présenter la réponse à sa question pendant 5 minutes. Quand on t'écoute, on doit comprendre d'où tu es parti(e), comment a progressé ta réflexion et le (ou les) résultat(s) à l'arrivée qui te permet(tent) de répondre à la question de départ. L'objectif est de rendre compte de tes résultats de façon **claire, argumentée et synthétique**. Tu n'auras **pas de notes écrites**, mais tu auras eu le temps pendant l'année de digérer tes découvertes et d'en proposer une version condensée. Attention : on juge **tout autant la solidité de tes connaissances que ta capacité à les transmettre** de façon pertinente et stimulante (voir p. XVI).

Comme toute prise de parole, ton discours est **adressé** : tu auras en face de toi deux professeurs de disciplines différentes que tu dois intéresser, dont un **expert** d'un des deux enseignements de spécialité que tu as choisi. Ton discours va devoir « parler » à tout le monde !

Le jour J

Au moment de la préparation précédant ton passage, tu peux si tu le souhaites réaliser **un support sur papier que tu remettras au jury**. Pour apprendre à le préparer, rends-toi à la page XIV. Ce support peut t'être utile pour remettre à plat les éléments principaux de ton discours, mais il peut également servir au jury pour te relancer en cas de blanc.



Chaque membre du jury est un expert d'une discipline. Il faut adapter ton discours.

Puis, dans un deuxième temps, un échange de 10 minutes a lieu avec le jury.

Rassure-toi : ce temps est d'abord **un échange** avec le jury qui t'invite à **préciser et approfondir** des éléments que tu as abordés. Durant ces 10 minutes, il t'interroge sur ta présentation mais il peut aussi élargir le propos au programme de tes enseignements de spécialité : il est donc tout à fait possible que l'on te pose une question sur d'autres notions moins liées à ton sujet de départ. On évalue aussi ta capacité d'adaptation : sois très attentif(ve) aux questions qu'on te pose et ne considère pas que ce sont des questions pièges pour te déstabiliser.

Cet échange ne peut t'apporter que des avantages !

Avec une présentation réussie, on peut se permettre d'aller encore plus loin et de revenir sur des éléments plus en profondeur. Si on a le sentiment d'avoir échoué, **cela peut être l'occasion de se rattraper** en montrant qu'on a bel et bien travaillé la question pour cette épreuve, et qu'on maîtrise bien les connaissances acquises dans ses deux spécialités.

Enfin, un dernier temps de 5 minutes permet d'échanger sur son projet d'orientation. La question présentée est **liée aux études que tu aimerais poursuivre** : elle est le reflet de ta curiosité et de ta motivation sur le long terme. Il est évident que se projeter et imaginer le chemin qu'on va emprunter dans la voie professionnelle est complexe : c'est pour cela qu'on doit s'être préparé en amont à cette étape pour en parler avec assurance.

Astuce

Imagine que tu poses une question que personne ne s'est jamais posée, et tu es le (la) seul(e) à en détenir la réponse. C'est comme si tu lançais un débat dans l'intention de donner envie à ton public d'interagir avec toi. Mieux vaut pour cela maîtriser ton sujet, et le prouver en utilisant un vocabulaire adapté qui montre que tu sais de quoi tu parles !

B Préparer son projet et organiser ses idées

« Pour commencer, il faut commencer... et on n'apprend pas à commencer, pour commencer, il faut simplement du courage. »

Vladimir Jankélévitch, philosophe (1903 – 1985)

Le discours doit être une synthèse dynamique de sa recherche mise en œuvre tout au long de l'année. **Plus on s'y sera préparé à l'avance, plus on est sûr de maîtriser son sujet et d'en parler sans ennuyer son auditoire.**

1. Choisir une question et la débroussailler

Tout d'abord, on doit trouver une question sur chacun de ses enseignements de spécialité ou une question en lien avec ses deux enseignements de spécialité. Le programme de l'enseignement de spécialité permet d'approfondir des questions en classe, et c'est dans ce réservoir qu'on va puiser pour orienter son choix. Il est important de te demander si cette question se rapproche de tes envies d'orientation professionnelle : tu n'as pas besoin de connaître forcément le métier que tu veux faire mais il te faudra savoir vers quels études et domaines d'activités tu souhaites t'orienter. En effet, on évaluera le lien du discours avec ton orientation. Après avoir défini les enjeux de l'étude, on doit rendre compte de la façon dont elle a été réalisée et justifier ses choix mis en œuvre : prends donc bien le temps de réfléchir lors de cette étape préparatoire.

Cette liberté de choix est une chance, mais aussi un défi : parfois, plus les idées foisonnent, moins on réussit à s'arrêter à l'une d'entre elles. Une fois ta décision prise, il faut éviter de changer d'avis en cours de route ! Le plus important est cette notion d'« envie » : sans ce moteur, on n'aura pas le sentiment que tu réponds à une question que tu as choisie parce que tu t'es senti concerné(e) par elle. Fais-toi confiance !

Astuce

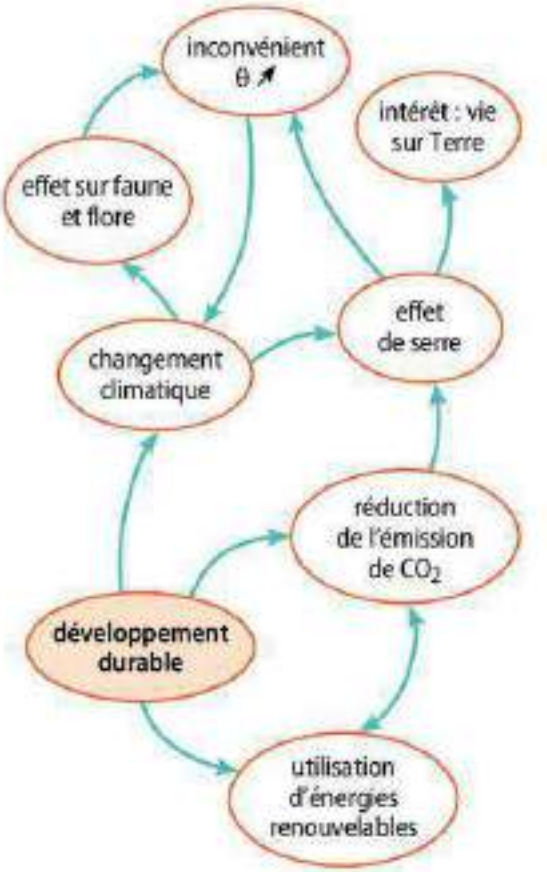
Cible un sujet qui t'a interpellé(e) lors de ton année d'enseignement. Y a-t-il un évènement récent qui aurait suscité ta curiosité ? As-tu vécu une expérience particulière ou as-tu réfléchi à quelque chose, mais sans avoir le temps de le mûrir suffisamment ? As-tu été interpellé(e) par une information, une émission, un article, un cours que tu souhaiterais approfondir ?

Astuce

Feuillette ton manuel pour avoir une idée de tout ce que tu vas apprendre cette année et repérer les sujets qui t'intéressent. Tu trouveras notamment dans chaque chapitre une page « Des pistes pour le Grand oral » avec un exemple de question à traiter. Cela pourra être une source d'inspiration.

EXERCICE 1 Débroussailler un thème

Commence par nommer une **thématique** qui t'intéresse, liée au programme que tu étudies en classe et à ton orientation. Inscris-la dans une bulle au centre d'une grand page blanche horizontale. À partir de ce noyau, inscris un sous-thème que tu trouves associé à ce thème et décline-le en essayant d'étendre au maximum un premier réseau. Pense aux questions *Qui ? Quoi ? Pourquoi ? Où ? Quand ? Comment ?* Une fois que tu crois avoir épuisé ton réservoir d'idées pour ce sous-thème, trouve un second sous-thème et recommence l'opération.



Astuce

Reprends cette carte plusieurs fois, à différents moments de la journée. Tu trouveras des choses bien différentes !

EXERCICE 2 Choisir un sujet

1. Les idées foisonnent, et tu vas devoir en choisir une et évacuer les autres. Comment faire ? Choisis en une, celle qui t'intrigue le plus, dont tu penses qu'elle est la plus stimulante. Réfléchis : qu'est-ce qui t'intéresse le plus dans ce domaine ? Qu'est-ce qui te questionne ? Pourquoi ?
2. Prends quelques minutes pour partager les raisons de ton choix à quelqu'un de ton entourage. Pour cela, imagine que tu dois le convaincre d'être ton associé(e) pour réaliser une expérience, et que sa présence est essentielle à sa mise en œuvre. Après avoir pris la parole, demande à ton (ta) partenaire de reformuler ton propos, et de te poser des questions sur le sujet.

→ Rien ne vaut l'avis des autres ! Prends soin de noter ce que ton (ta) partenaire a retenu de l'exposé de ton idée : quels éléments n'a-t-il (n'a-t-elle) pas rappelés ? As-tu suffisamment insisté là-dessus quand tu en as parlé ?

→ Il ne s'agit pas d'énoncer ton projet, de parler de ce que tu vas chercher à démontrer (tu ne le sais pas encore !). Il s'agit plutôt de sentir si tu es spontanément et suffisamment intéressé(e) par un thème pour susciter la curiosité de quelqu'un d'autre et lancer une discussion.

2. Organiser son temps et orienter ses recherches

Choisir l'angle de son projet de recherche : la question.

En faisant l'inventaire des sources d'information disponibles, on peut se rendre compte que certaines questions posées par la communauté scientifique ou le grand public sont souvent loin d'être évidentes ou que des opinions peuvent diverger pour y répondre. D'autres questions sont parfois complexes ou demandent à être mises en perspective. L'objectif est de **faire sa propre enquête** : à partir d'hypothèses, on doit faire une recherche pour tenter d'apporter ses réponses.

Astuce

Au cours du travail, ton sujet et ta problématique évoluent. C'est tout à fait normal ! Il peut arriver que ta question prenne du temps pour se stabiliser. Néanmoins, il est essentiel de réussir à en formuler une première version dès le départ puisqu'elle est le fil rouge qui orientera toute la logique de ton argumentation.

Autrement dit, la présentation n'est ni une définition ni un catalogue : on ne doit pas avoir l'impression d'entendre une liste d'informations, mais quelqu'un qui donne **une réponse argumentée à une question**. On doit trouver un cheminement logique dans ce qui est dit : un point de départ et un point d'arrivée. Le propos est donc **personnel, construit et appuyé sur des exemples précis** qui témoignent de la solidité du raisonnement. En un mot, l'objectif est d'être **clair(e) et convaincant(e)** !

Éviter de s'éparpiller et être stratégique. Pour cela, on **liste toutes les étapes de son travail**, et on détermine dès le départ **le temps qu'on va consacrer** à chacune d'elles. On doit essayer d'être le plus précis possible, en comptant toujours plusieurs temps vides : en effet, on oublie toujours des choses. Ces échéances sont très importantes pour **ne pas se retrouver enfoui sous les échéances à la dernière minute** !

Exemple de planning possible :

- 1er trimestre Choisir ma question
- 10/01 Quels articles sur mon sujet ?
- 20/02 Enquête
- 05/03 Quels docs sont les plus importants ?
- 05/04 Rédaction de la présentation (2 semaines)
- 20/04 Mes fiches de révision
- 03/05 Définitions clés et vocabulaire : apprendre par ♥ !
- 15/05 Introduction et conclusion…
- 2e quinzaine de mai Répétition de la situation d'oral…

Rassembler la matière et les supports associés à son sujet : il peut s'agir de faits (événements historiques, événements de société), d'articles de journaux, de résultats d'expériences (actuelles ou anciennes), de connaissances (données scientifiques, théories, modèles, données culturelles) ou de différents points de vue sur la question. On veille à **diversifier ses sources** : manuel, livres, revues, vidéos, sites Internet, cours, exercices et TP réalisés avec son professeur au lycée… Il ne s'agit pas de les démultiplier, mais de **sélectionner les plus pertinentes** en gardant toutefois en tête les autres. Même si on ne garde pas tout pour la version finale, **ces informations pourront éventuellement être utiles lorsqu'il s'agira de répondre aux questions au cours de l'entretien.**

Astuce

Garde bien la source de tous ces documents et classe-les dans un dossier bien rangé pour vite les retrouver.

On doit avoir des connaissances solides sur son sujet, et maîtriser les notions scientifiques qui lui sont liées : assure-toi d'**être bien avisé(e) des éléments du programme** (Terminale, mais aussi Première) et de **connaître le vocabulaire scientifique** mobilisé pour la présentation. Pour s'exprimer clairement, on doit être à l'aise avec ce « langage », et donc **en avoir appris les définitions.**

Astuce

Si des éléments te paraissent un peu flous, **ne les évite pas** : aborde-les avant ta présentation, pour ne pas prendre le risque d'être mis en difficulté lors de l'échange avec le jury.

Astuce

Tu veux en savoir plus sur tel métier / telle entreprise ? Tu voudrais interviewer un professionnel ? Réaliser un sondage en ligne ? Visiter un lieu ? Profite de cette occasion du Grand oral pour enquêter sur ton terrain : ton discours sera d'autant plus convaincant !

EXERCICE 3 Repérer et sélectionner les idées essentielles d'une information

Podcast Science est une émission hebdomadaire qui couvre chaque semaine un sujet scientifique. Tu peux la trouver ici : https://www.podcastscience.fm/. Son objectif ? Faire aimer la science au plus grand nombre par le biais d'une communication accessible et dynamique.

1. Avec un(e) camarade, réserve une heure pour écouter un de ces podcasts en ligne. Chacun(e) de vous prend en note le maximum d'éléments-clés : des références (date, auteur, thématique principale de l'émission), les grands axes du sujet, les questions soulevées, les axes du débat, quelques données chiffrées et des exemples.
2. Compare ta prise de notes avec celle de ton (ta) camarade : avez-vous relevé les mêmes informations ? Mettez-vous d'accord sur le plus utile afin d'aboutir à un relevé commun.

Le jour J

Pour t'aider, sois attentif(ve) à la répétition de certains propos, à leur intonation, et à l'emploi des mots d'articulation qui indiquent les différents moments de synthèse. Ce sont comme des indices d'écoute que tu devras t'efforcer de mettre en valeur lorsque tu prendras la parole à ton tour !

C Structurer son discours

1. Construire un plan pertinent

Il existe différents plans pour organiser un discours.

Pour aller au-delà des plans classiques thématiques, on peut suivre cette méthode :

A – Accroche

B – Annonce de la question et explication : on définit son sujet et on explique pourquoi on a choisi de préparer cette question.

C – Développement progressif de la question : on informe, discute le sujet au moyen de données et de connaissances scientifiques précises, détaillées et variées. On démontre la cohérence de son idée en justifiant ses arguments par des exemples :

- données chiffrées, schémas, illustrations concrètes ;
- applications, expériences menées ;
- témoignages.

D – Conclusion : réponse à la question.

Le jour J

Pour éviter toute monotonie dans ton discours, il peut être utile d'avoir en tête différents types d'arguments :

- **argument par la cause : on s'appuie sur la cause d'un phénomène ;**
- **argument par la conséquence : on s'appuie sur les effets d'un phénomène et on montre ses avantages et ses inconvénients ;**
- **argument par la comparaison : on établit un parallèle entre deux situations ;**
- **argument d'autorité : on peut citer les propos d'un expert, d'un scientifique reconnu ;**
- **argument de valeur : on fait appel aux grands principes fondant la société (écologie, éthique…).**

2. Formuler une accroche percutante

L'accroche est la première phrase qu'on prononce dans son introduction : elle doit être **très courte** (15 secondes maximum), percutante et pertinente par rapport à son sujet. Son rôle est d'**interpeller l'auditoire** et d'attirer son attention : il faut donc éviter le plus possible les lieux communs ou les banalités. On peut :

- faire un état des lieux de la question : on situe le sujet dans le contexte actuel ;
- relater un fait surprenant, marquant, une anecdote ;
- poser une question : cette question n'attend pas de réponse, mais a pour objectif d'interpeller le jury ; comme s'il était directement concerné. Exemple : « Avez-vous déjà pensé à… ? », « Vous êtes-vous déjà retrouvé(e) dans une situation où… ? »… ;
- faire une remarque personnelle qui montre sa motivation et les raisons du choix de son sujet.

Le jour J

Essaye toujours de connaître une **anecdote**, la dernière étude sur ton sujet ou la façon dont la presse et les médias en ont parlé, etc. Rien de mieux qu'un savoir actualisé pour montrer que tu es au courant de l'évolution de la recherche scientifique.

3. Soigner son discours

Un propos doit être fluide pour être agréable à entendre. Fais des phrases simples et courtes, avec une seule idée par phrase. Associe à **chaque argument** une **articulation logique du discours**, ces petits mots sont essentiels pour signifier à son jury :

- **qu'on commence, qu'on développe une nouvelle idée** : *commençons par, d'abord, avant tout, en premier lieu, d'une part, certes, s'il est vrai que, sait-on que…*
- **qu'on marque un lien** entre ce qui précède et ce qui suit : *puis, aussi, ensuite, d'autre part, de plus, ainsi, par conséquent, c'est pourquoi, cependant, toutefois, pourtant, au contraire, d'ailleurs…*
- **qu'on rappelle** ce qui a été dit, en fait le bilan : *ainsi, de même, de là, d'où, pour cela…*
- **qu'on conclut** : *donc, enfin, en résumé, en définitive, pour conclure…*

Le jour J

Sois conscient(e) de tes **tics de langage**. Interdis-toi les « du coup », « en fait », tout comme « euh », « voilà » ou « genre ». S'il t'arrive de faire une faute de français, excuse-toi et corrige-toi : ne fais pas comme si personne ne l'avait entendue.

EXERCICE 4 Varier son vocabulaire

Sans notes, répète ta présentation avec un(e) camarade. Son rôle est de relever toutes les fois où tu as recouru aux verbes passe-partout « être », « avoir », « faire », « voir », « dire » ou « mettre ».

Une fois la présentation terminée, cherche un autre terme pour remplacer chacun d'entre eux.

4. Travailler sa conclusion

La conclusion doit être soignée : ce temps laisse une impression définitive de son enthousiasme sur l'auditoire. On fait un **bilan très bref** de ce qu'on vient d'exposer et on peut faire une **ouverture** : en montrant que les enjeux de son sujet sont aussi liés à tel autre sujet, en mentionnant une appropriation de sa thématique dans un autre domaine (cinéma, enjeu de société…).

Le jury doit sentir qu'on s'apprête à terminer son discours : on peut marquer un temps de pause, ralentir le débit de sa voix et faire entendre dans le ton la clôture de son intervention.

Le jour J

Tu n'as aucune idée d'ouverture pour ta conclusion ? Eh bien ce n'est pas grave ! Contente-toi de faire une synthèse de ton intervention : il vaut mieux éviter une conclusion « remplissage » qui pourrait tout gâcher !

D Préparer sa prise de parole

1. Quelle est mon expérience de l'oral ?

Tu as déjà eu une expérience de prise de parole en public au lycée.

1. **L'épreuve orale de français** avec la lecture à haute voix d'un texte : tu as lu l'extrait de façon expressive si tu t'en es emparé(e) et si tu l'as doté d'une intention.

2. **L'expérimentation en équipe** : lorsque tu as dû exprimer ton point de vue, te positionner et prendre en charge une partie d'un travail et donc négocier avec tes camarades et argumenter.

3. **L'exposé ou la restitution d'un travail en classe** : tu as déjà fait des exposés devant la classe et résolu des exercices au tableau.

Astuce

Les meilleures notes à l'épreuve orale de français sont obtenues par les élèves qui ont non seulement prouvé qu'ils connaissaient bien leur sujet, mais surtout qui ont défendu leur présentation de façon convaincante.



« La parole n'a pas été donnée à l'homme : il l'a prise. »

Louis Aragon, écrivain (1897-1982)

Si tout le monde a la parole, très peu de personnes la prennent. Dans la parole, la différence ne se fait pas entre celui qui se tait et celui qui parle, mais entre celui qui ne fait que parler, et celui qui s'exprime comme il faut. On pense souvent que bien parler est d'emblée une qualité qu'on a la chance d'avoir toujours eue… On entend dire que c'est « tout un art » : « si l'on n'est pas naturellement doué pour cela, on ne sera jamais capable de se sentir à l'aise ». Bref, l'oral fait peur.

Il n'y a pourtant pas de quoi, car, comme dans les autres matières, **l'oral s'apprend** avec des techniques fondamentales à maîtriser. Quelle que soit la façon dont on se situe, on a tous forcément quelque chose à améliorer avec la parole… La question c'est : quoi ?



→ Voir EXERCICE 7

2. Apprendre à gérer son temps



On peut prévoir à l'avance le temps de pause de sa voix en le marquant d'un coup de crayon sur son brouillon. Le stress de l'intervention en temps réel fait très souvent légèrement accélérer le débit initial de la voix. Pour éviter le risque de parler trop longtemps, on distingue à l'avance les principaux moments : le début (1 min 30 s), les arguments (3 min) et la conclusion (30 s). **On peut s'entraîner avec un(e) camarade** à dire chacun des morceaux de son intervention l'un après l'autre sans dépasser le temps qu'on a déterminé.

3. Mémoriser son discours

On l'a bien compris : **l'objectif n'est pas de réciter** son discours, mais de se sentir libéré(e) du texte pour être pleinement dans sa présentation au jury. N'oublie pas que tu n'auras pas de notes avec toi.

Commence par te concentrer sur le début et la fin : il est essentiel de garder comme horizon mental la conclusion de sa démonstration pour faire sentir qu'on sait où l'on va.

Astuce

Tu peux recopier le contenu entier de ton exposé sur des feuilles en plusieurs exemplaires. Fixe-les sur des murs stratégiques de chez toi : ce sont les murs des lieux où tu passes beaucoup de temps (la salle de bains, ta chambre, les toilettes...).

Astuce

Enregistre-toi sur ton téléphone et écoute-toi régulièrement lors de tes déplacements.

N'hésite pas à réaliser une fiche aide-mémoire de poche où tu auras inscrit tes arguments et exemples sous forme de mots-clés, ainsi que les articulations de liaison qui font passer d'une idée à l'autre.

EXERCICE 5 Mémoriser les notions scientifiques et les mots-clés

Pendant ta préparation, tu as recensé dans le cours et dans le manuel toutes les notions scientifiques, les mots-clés et les schémas en lien avec ta question. Trouve un(e) camarade qui a choisi le même chapitre que toi pour sa présentation.

1. Chacun de vous liste sur une page les éléments qu'il (elle) prévoit de mobiliser dans sa présentation.
2. Échangez vos feuilles et interrogez-vous sur les notions comme si vous étiez un membre du jury. Par exemple : « Quelle est la définition de … ? » « Pouvez-vous m'expliquer le mécanisme de … ? »

EXERCICE 6 Mémoriser par le corps

« On apprend par corps et non par cœur. »

Pierre Bourdieu, sociologue (1930 – 2002)

Quand tu te sens prêt(e), répète ton discours en déclamant chacune de ses parties dans une pièce différente de chez toi :

- la porte d'entrée : l'accroche ;
- le couloir : l'introduction ;
- la première pièce : le premier axe… etc.

À chaque fois que tu oublies un élément ou que tu butes sur une information, fais demi-tour et reprends la parole à la pièce précédente.

4. Travailler sur son apparence et sa posture



Astuce

Tu peux utiliser une salle de classe vide pour te mettre en situation. Demande à un(e) camarade de se placer au fond de la salle puis, tout en t'écoutant faire un discours, de bouger de temps en temps : tu dois réussir à faire ton discours sans être perturbé(e).

Travailler sa posture pour être regardé(e) : avant même de formuler des phrases, une intervention commence dès qu'on se présente devant le public. Des études ont montré que plus de 60 % de l'efficacité d'une prise de parole repose sur le langage corporel. Il faut donc travailler sa posture.

- **Se tenir bien.** Avant de commencer à parler, on **s'ancre** bien dans le sol, les pieds écartés de manière à se sentir stable. Imaginer qu'on tire un fil de marionnette au-dessus de son crâne et qu'il tend tout son corps est un bon exercice. Si on est bien d'aplomb, le « trac » se voit moins.

- **Contrôler les gestes** qui peuvent parasiter son auditoire : on évite de se balancer, de passer d'une jambe sur l'autre, de fermer les poings, de se tripoter les mains ou de les mettre dans ses poches. On fait en sorte que ses mains soient toujours visibles : elles permettent de mettre en valeur ses paroles.
- **Regarder son public bien en face.** Ne pas le fuir. Le regard est déterminant car il permet de capter l'attention de ceux qui nous écoutent. Il nous permet aussi de nous adapter : si on sent que le public n'est pas attentif, on peut prendre un ton plus animé. On peut penser aussi à balayer du regard tous les membres de l'auditoire.
- **Être souriant(e)**, montrer son envie, sa détermination !

Travailler son expression pour être écouté(e) : on n'écrit pas comme l'on parle. Le style oral a ses règles : **les phrases courtes et les moments où on hausse le ton, on ralentit ou on marque des pauses sont essentiels.**

- **Faire un court temps de silence** avant de prendre la parole. Cela te permettra de te concentrer, et de vérifier que ton auditoire est attentif. **Ne parle pas trop vite :** le plus souvent, sous l'effet du stress, on a tendance à accélérer le rythme de sa parole.
- **Faire des pauses entre ses phrases** quand on parle. Les silences te permettent de reprendre ton souffle, contrôler ta parole, mais aussi de capter l'attention ou de susciter une attente.
- **Articuler.** Si tu manges tes mots, tu donneras l'impression que tu veux te débarrasser de ton discours, et l'auditoire n'aura pas le temps de comprendre ce que tu dis.

Astuce

Si tu as tendance à ne pas parler assez fort, c'est peut-être parce que tu n'es pas sûr(e) de toi ou parce que tu as le trac : un simple exercice de respiration abdominale peut te permettre de gérer ton stress et de projeter ta voix comme il faut dans l'espace.

- **Varier le ton pour ne pas ennuyer :** il peut être tantôt fort, tantôt doux, tantôt grave, tantôt drôle. Il suffit de varier le volume de ta voix ainsi que son débit pour réveiller ton public.

Le jour J

Adopte une tenue qui te ressemble mais que tu auras réservée pour le Grand oral : cela peut t'aider à te mettre en conditions, comme l'acteur qui enfile son costume !

EXERCICE 7 Se filmer avec la caméra du smartphone

Fais un petit discours à un(e) camarade : tu peux, par exemple, raconter une expérience que tu as vécue ou défendre un point de vue sur un sujet d'actualité. Demande-lui de te filmer avec ton smartphone : une première fois assis(e), face à lui (elle), autour de la même table et une deuxième fois debout, à quelques mètres de distance.

1. Commence par demander à ton ami(e) de relever les **éléments positifs** de ta prise de parole. Visualise la vidéo pour en tirer des conseils pour t'améliorer.
2. Note les moments où tu sens que l'information est la plus audible. Pour quelles raisons, selon toi ?
3. À l'inverse, essaye de comprendre les éléments de ton langage responsables de l'imprécision ou de la confusion des idées que tu exprimes :
   - Est-ce dit trop rapidement ?
   - T'entend-on suffisamment ?
   - As-tu une voix trop monocorde ?

Sois bienveillant(e) ! Cet exercice est difficile, mais tu dois garder en tête que l'image amplifie toujours les défauts : ce n'est pas une image fidèle de la réalité, et dis-toi que c'est plus une loupe qu'un miroir de ton apparence. Pour t'aider, imagine que tu analyses quelqu'un d'autre.

EXERCICE 8 **Varier les tons de sa voix**

Quand tu parles, le ton de ta voix est peut-être souvent le même, et tu ne t'en rends pas forcément compte. Sur des petits papiers, inscris les différents tons de la voix : *abrupt, tendu, doux, enthousiaste, surpris, grave, impatient, magistral, timide, uniforme*. Pioche un papier au hasard et lis les phrases suivantes :

- *Est-ce dit trop rapidement ?*
- *Tu es au courant ?*
- *Ces chiffres sont catastrophiques !*
- *Il faut changer les choses.*
- *J'ai réussi !*
- *Je suis très content(e) d'apprendre cela*
- *C'est horrible…*
- *Mais qu'attends-tu pour le faire ?*
- *Hier soir, ils ont annoncé une bonne météo.*
- *Si j'étais toi, je tenterais ma chance.*

Si vous êtes deux : placez-vous l'un(e) en face de l'autre et faites l'exercice en vous répondant.

N'hésite pas à ajouter des gestes pour accompagner ta parole ! Une fois l'exercice réalisé, choisis la tonalité la plus adaptée à chaque phrase et relis-les.

E Se préparer à l'entretien avec le jury

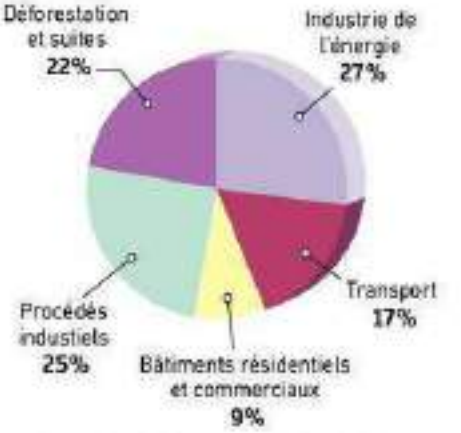
1. Préparer un support pour le jury

Durant les 20 minutes de préparation, on doit **mettre en ordre ses idées** sur la question choisie par le jury. L'exposé se fait **sans notes**, mais on a la possibilité de remettre au jury un support. Celui-ci est utile pour plusieurs raisons : il peut **illustrer ce qu'on décrit, concrétiser une idée** ou la démontrer. Cela peut aussi être une occasion de proposer **une interprétation graphique** qu'on peut citer comme un raccourci efficace pour faciliter la compréhension de la démonstration. Tout dépend donc de l'objectif qui est visé. Quoi qu'il en soit, cette fiche doit être très lisible et la plus simple possible à comprendre.

Pour t'aider, **n'hésite pas à t'inspirer des schémas proposés par le manuel.**



Schéma



Graphique : émissions de CO2 globales par sources d'activités

Astuce

Réalise à plusieurs reprises ton support avant le Grand oral pour l'avoir bien en tête le jour J et ne pas perdre trop de temps à le réaliser.

Le jour J

Tu peux faire figurer ton plan sur ton support avec les principaux enjeux de ta prise de parole : les réécrire peut te permettre de te les remémorer visuellement une dernière fois, mais c'est aussi un aperçu que tu donnes au jury qui pourra s'y référer lors de l'entretien. Prends soin de le rédiger lisiblement.

Le jour J

Tu peux ajouter quelques sources d'information précises que tu as peur d'oublier comme une source, un résultat d'expérience, des formules, des chiffres clés : si jamais tu oublies de les dire, il restera une trace de ton travail à partir de laquelle on pourra t'interroger.

2. Distinguer les différents types de questions du jury

À la suite de sa présentation, on doit réagir aux questions des examinateurs pendant 10 minutes. Si tu le souhaites, tu peux t'asseoir : cela t'aidera à laisser redescendre la pression. Rassure-toi : tu ne vas pas subir un interrogatoire ! Le jury n'est pas là pour te mettre en difficulté mais pour t'encourager à approfondir. Il n'y a pas de questions pièges. Dans cet échange, on montre surtout la **solidité de ses connaissances** et sa capacité à prendre de la distance, à **argumenter** et à **élargir son exposé** à d'autres parties du programme.

Prends le temps d'évaluer les réactions du jury et de cerner la nature de la question : mieux vaut quelques secondes de silence plutôt qu'une réponse toute faite ou précipitée.

L'examinateur peut poser plusieurs types de questions qu'on doit bien écouter pour orienter ses réponses. Il pourra ainsi demander de :

- **Préciser, clarifier :** il peut arriver qu'on soit passé trop vite sur une information et qu'on se soit exprimé de façon confuse. En te demandant de préciser ou de clarifier, le jury veut vérifier que tu maîtrises bien ton information.
- **Développer :** le jury veut obtenir une information manquante ou vérifier si on a suffisamment de connaissances sur un sujet abordé pendant la question. Il peut te suggérer de développer une idée pour t'orienter dans ta démarche ou pour voir les liens que tu tisses avec d'autres entrées du programme. **N'oublie pas que tu peux être interrogé(e) sur des notions de ton enseignement de spécialité que tu as apprises lors du 3e trimestre !**
- **Justifier :** on peut être questionné sur son choix personnel de sujet, sur la façon dont on a préparé son exposé ou sur l'origine de son contenu.

3. Justifier ses choix d'orientation

L'épreuve se termine avec un échange de 5 minutes sur son projet d'orientation.

Tu dois expliquer en quoi la question traitée éclaire ton projet de poursuite d'études, voire ton projet professionnel : au cours de la préparation de ta question, as-tu pris conscience des attentes de tes études l'année prochaine ? En quoi ton projet a-t-il été **l'occasion pour toi de te préparer aux enjeux de la profession** que tu envisages pour ton avenir ?

Le jury est conscient de la difficulté à se positionner dès maintenant avec assurance sur l'avenir. Il n'attend pas que tu lui prouves que tu es sûr(e) à 100 % de tes orientations ! Tu dois rendre compte de la **curiosité** et du **sérieux** avec lesquels tu t'es posé des questions concrètes sur tes projets possibles. Autrement dit : tu as **5 minutes pour exprimer tes motivations**.

Commence par exposer les différentes étapes de la maturation de ton projet : pour te renseigner sur ton orientation, tu as pu faire des rencontres inspirantes, enquêter auprès de ton entourage, t'engager dans des actions ponctuelles, dans des activités extra-scolaires... Tu as peut-être eu la chance de partir à l'étranger ou de faire un stage en lien avec ton projet d'études. Tu peux aussi avoir développé ton intérêt pour un métier par le biais d'un enseignement, et l'avoir approfondi dans le choix de ta spécialité.

Astuce

Ton envie de démarrer telles ou telles études est née par hasard ? Aucun problème ! Tu peux très bien commencer par l'annoncer ainsi, du moment que par la suite tu montres de façon convaincante que tu t'es personnellement renseigné(e) sur ce sujet (en allant par exemple sur le site de l'ONISEP www.onisep.fr qui est très complet).

Explique la manière dont tu souhaites mener ton projet après le baccalauréat : as-tu choisi de faire une licence ? Un BTS ou un DUT ? Une classe préparatoire ? Une école ? Sais-tu d'ores et déjà le nombre d'années d'études qui t'attend pour obtenir ton diplôme ? **Explique les moyens que tu veux mettre en œuvre pour faire aboutir ton projet.**

Astuce

Ne sois pas dupe de toi-même : il est inutile d'inventer des histoires pour te mettre en valeur. Le jury n'est pas là pour te juger, mais pour t'entendre en toute honnêteté rendre compte d'un projet. Celui-ci ne doit pas être exceptionnel ! Il doit seulement te correspondre.

F Grille d'évaluation indicative du Grand oral

Voici les critères sur lesquels tu seras évalué(e).

	Très insuffisant	Insuffisant	Satisfaisant	Très satisfaisant
Qualité orale de l'épreuve	• Difficilement audible sur l'ensemble de la prestation. • Le candidat ne parvient pas à capter l'attention.	• La voix devient plus audible et intelligible au fil de l'épreuve mais demeure monocorde. • Vocabulaire limité ou approximatif.	• Quelques variations dans l'utilisation de la voix ; prise de parole affirmée. Il utilise un lexique adapté. • Le candidat parvient à susciter l'intérêt.	• La voix soutient efficacement le discours. • Qualités prosodiques marquées (débit, fluidité, variations et nuances pertinentes, etc.). • Le candidat est pleinement engagé dans sa parole. Il utilise un vocabulaire riche et précis.
Qualité de la prise de parole en continu	• Énoncés courts, ponctués de pauses et de faux démarrages ou énoncés longs à la syntaxe mal maîtrisée.	• Discours assez clair mais vocabulaire limité et énoncés schématiques.	• Discours articulé et pertinent, énoncés bien construits.	• Discours fluide, efficace, tirant pleinement profit du temps et développant ses propositions.
Qualité des connaissances	• Connaissances imprécises, incapacité à répondre aux questions, même avec une aide et des relances.	• Connaissances réelles, mais difficulté à les mobiliser en situation à l'occasion des questions du jury.	• Connaissances précises, une capacité à les mobiliser en réponses aux questions du jury avec éventuellement quelques relances.	• Connaissances maîtrisées, les réponses aux questions du jury témoignent d'une capacité à mobiliser ces connaissances à bon escient et à les exposer clairement.
Qualité de l'interaction	• Réponses courtes ou rares. • La communication repose principalement sur l'évaluateur.	• L'entretien permet une amorce d'échange. • L'interaction reste limitée.	• Répond, contribue, réagit. Se reprend, reformule en s'aidant des propositions du jury.	• S'engage dans sa parole, réagit de façon pertinente. • Prend l'initiative dans l'échange. • Exploite judicieusement les éléments fournis par la situation d'interaction.
Qualité et construction de l'argumentation	• Pas de compréhension du sujet. • Discours non argumenté et décousu.	• Début de démonstration mais raisonnement lacunaire. • Discours insuffisamment structuré.	• Démonstration construite et appuyée sur des arguments précis et pertinents.	• Maîtrise des enjeux du sujet, capacité à conduire et exprimer une argumentation personnelle, bien construite et raisonnée.

PHYSIQUE CHIMIE

Tle

Programme 2020

Enseignement de spécialité

Collection ESPACE

Sous la direction de

Mathieu Ruffenach
Inspecteur d'académie, inspecteur pédagogique régional, académie de Montpellier

Thierry Cariat
Professeur au lycée Dhuoda, Nîmes

Stéphane Baderot-Jacques
Lycée Marc Bloch, Sérignan

Pascal Bottos
Lycée Charles Baudelaire, Annecy

Nicolas Courbaize
Lycée Jean Jaurès, Saint-Clément-de-Rivière

Christophe Feuvrie
Lycée Joffre, Montpellier

François Fourcade
Lycée Dhuoda, Nîmes

David Gariglio
Lycée Dhuoda, Nîmes

Bastien Gravière
Lycée Lalande, Bourg-en-Bresse

Laurent Lopez
Lycée Aristide Maillol, Perpignan

Guillaume Lozé
Lycée Alphonse Daudet, Nîmes

Adeline Marois
Annexe du lycée Jean-Baptiste Say
Centre Édouard Rist, Paris

Sylvie Mellet
Collège Samuel Vincent, Nîmes

Itala Riahi
Lycée Beth Hanna, Paris

Laurent Roure-Atger
Lycée Dhuoda, Nîmes

Émilie Spony
Lycée Jules Haag, Besançon

Laurent Toix
Lycée Aristide Maillol, Perpignan

Cédric Vial
Lycée François Mauriac, Andrézieux-Bouthéon

Avec la participation d'Adèle Godefroy
Formatrice en communication écrite et orale, Université Sorbonne-Nouvelle

bordas éditeur

POUR BIEN PRÉPARER LE BAC AVEC VOTRE

Les acquis à réviser

En début de chaque chapitre, retrouvez les **notions indispensables** étudiées dans les classes précédentes.

Testez-vous avec les situations proposées.

Les **corrigés détaillés** des tests sont disponibles en version numérique.



La fiche mémo



L'essentiel à savoir. Le **vocabulaire et les formules à connaître** sont stabylotés.

Les exercices de base

Voici tous **les savoir-faire à maîtriser** et les exercices corrigés associés.

Les **solutions** sont en fin de manuel et des **corrigés détaillés** existent en version numérique.





Faites le point sur vos compétences avant de passer aux exercices de niveau supérieur.

Des **cartes mémo numériques** avec les corrigés (*ou flashcards*) sont disponibles.

Les exercices résolus

Ces exercices sont totalement résolus avec en plus des **conseils de méthode**.

Ils sont suivis d'un **exercice similaire** corrigé en fin de manuel.

Corrigés détaillés en version numérique.



Les exercices pour s'entraîner



Une grande variété d'exercices d'entraînement.

34 Les exercices de numéro bleus sont **corrigés** en fin de manuel

Corrigés détaillés en version numérique.

Des exercices pour s'entraîner à être à l'aise **à l'oral**.

© BORDAS/SEJER, Paris 2020 - ISBN : 978-2-04-733763-9

MANUEL ET SES RESSOURCES NUMÉRIQUES

Les exercices PRÉPA BAC

• À la fin de chaque chapitre, des **exercices spécifiques type Bac.**

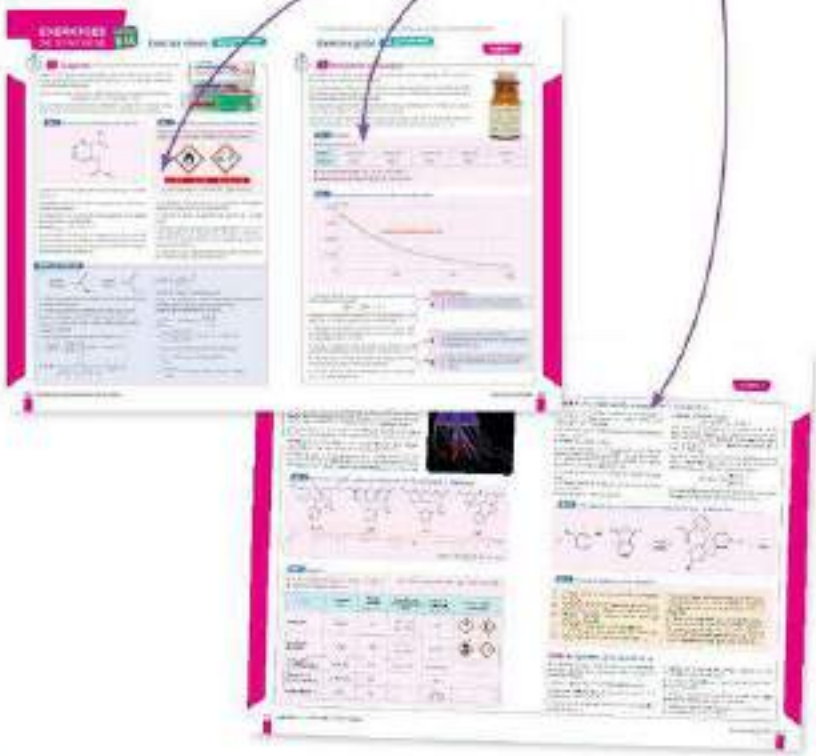


L'un d'entre eux est **corrigé** dans le manuel et en version numérique.

Flash PAGE corrigé détaillé

• À la fin de chaque partie, encore d'autres **exercices de type Bac.**

• Des **exercices corrigés**
• Des exercices avec des **aides**
• Et des exercices sans filet !



La préparation à l'ECE

En fin de chapitre, des **sujets type ECE** pour se familiariser avec l'épreuve expérimentale.



10 vidéos pour **maîtriser des gestes expérimentaux.**

GESTE ECE n° 8

Flash PAGE vidéo

La préparation du Grand oral

En début de manuel, un **livret complet** pour être à l'aise le jour du Grand oral.



En fin de chaque chapitre, des **pistes** de **questions** à préparer et des présentations de **métiers.**



Et n'oubliez pas

Les **fiches** MATHS, méthode et pratiques à la fin du manuel.

SOMMAIRE

RABATS

Présentation de Bordas Flashpage I
Les relations utiles ..... II à V
Données de référence V
Tableau périodique VI

Pour bien préparer le Bac avec votre manuel et ses ressources numériques 2
Les ressources numériques du manuel 7
Les compétences de la démarche scientifique 8
Les compétences dans le manuel 9
Le programme de physique-chimie Tle 10

CONSTITUTION ET TRANSFORMATIONS DE LA MATIÈRE

1 Transformations acide-base C 16

ACTIVITÉS

1. Évolution des notions d'acide et de base 18
2. Réaction acide-base Classe inversée 19
3. Schéma de Lewis d'un couple acide-base 20

2 Méthodes physiques d'analyse C 40

ACTIVITÉS

1. Calcul du pH d'une solution TP 42
2. Dosage par conductimétrie TP 43
3. Spectroscopie infrarouge TP 44

3 Méthodes chimiques d'analyse C 64

ACTIVITÉS

1. Dilution d'une solution TP 66
2. Titrage suivi par pH-métrie TP 67
3. Titrage par conductimétrie 68

4 Évolution temporelle d'un système chimique C 88

ACTIVITÉS

1. La catalyse TP 90
2. Le formalisme de la flèche courbe Classe inversée 91
3. Facteurs cinétiques TP 92
4. Suivi cinétique d'une transformation TP 93

5 Transformations nucléaires P C 113

ACTIVITÉS

1. Diagramme de stabilité des noyaux 114
2. Différents types de radioactivité 115
3. Datation au carbone 14 116
4. Applications en médecine Classe inversée 117

6 Sens d'évolution spontanée d'un système C 136

ACTIVITÉS

1. À la recherche des réactifs disparus TP 138
2. État final d'un système TP 139
3. Réalisation d'une pile TP 140

7 Force des acides et des bases C 160

ACTIVITÉS

1. Constante d'acidité d'un couple acide-base TP 162
2. Force des acides et des bases TP 163
3. Composition d'un vinaigre TP 164
4. Diagrammes d'un couple acide-base TP 165

8 Forcer le sens d'évolution d'un système C 186

ACTIVITÉS

1. Principe de l'électrolyse Classe inversée 188
2. Le dihydrogène, une solution d'avenir TP 189

9 Stratégies en synthèse organique C 208

ACTIVITÉS

1. Synthèse de l'acide hippurique TP 210
2. Synthèses comparées d'une espèce odorante TP 212
3. Stratégie de synthèse organique 213

Exercices de synthèse PRÉPA BAC 232

MOUVEMENT ET INTERACTIONS

10 Description d'un mouvement P 244

ACTIVITÉS

1. Étude d'un mouvement 246
2. Mouvement de la Terre sur son orbite TP 247
3. Descente olympique en bobsleigh TP 248

Chimie
Physique

11 Deuxième loi de Newton P ... 268

ACTIVITÉS

1. Centre de masse d'un système TP ... 270
2. Référentiel galiléen ... 271
3. La 2e loi de Newton TP ... 272
4. Le téléski ... 273

12 Mouvement dans un champ uniforme P ... 292

ACTIVITÉS

1. Un accélérateur linéaire ... 294
2. Mouvement d'un projectile TP ... 295
3. Électron et charge élémentaire ... 296
4. Chute d'une bille dans un liquide TP ... 297

13 Mouvement dans un champ de gravitation P ... 316

ACTIVITÉS

1. Le système solaire à travers les siècles ... 318
2. Orbite de Mercure TP ... 319
3. La comète de Halley TP ... 320
4. La masse de Jupiter ... 321

14 Écoulement d'un fluide P ... 340

ACTIVITÉS

1. La poussée d'Archimède TP ... 342
2. Les grandeurs caractéristiques de l'écoulement d'un fluide TP ... 343
3. Relation de Bernoulli TP ... 344
4. Hauteur d'un jet d'eau ... 345

Exercices de synthèse PRÉPA BAC ... 364

ÉNERGIE : CONVERSION ET TRANSFERTS

15 Modèle du gaz parfait P ... 376

ACTIVITÉS

1. Décrire le comportement d'un gaz Classe inversée ... 378
2. L'équation d'état du gaz parfait TP ... 379
3. Estimer les limites du modèle du gaz parfait TP ... 380

16 Premier principe de la thermodynamique P ... 396

ACTIVITÉS

1. Modes de transfert thermique Classe inversée ... 398
2. Capacité thermique ... 399
3. Température terrestre moyenne ... 400
4. Loi de refroidissement de Newton ... 401

Exercices de synthèse PRÉPA BAC ... 422

ONDES ET SIGNAUX

17 Les phénomènes ondulatoires P ... 428

ACTIVITÉS

1. Atténuation en dB TP ... 430
2. Diffraction TP ... 431
3. Interférences de deux ondes à la surface de l'eau TP ... 432
4. Résolution de l'écran d'un smartphone par interférences TP ... 433
5. Effet Doppler TP ... 434

18 Formation d'images P ... 454

ACTIVITÉS

1. Maquette d'une lunette astronomique afocale TP ... 456
2. L'infini, c'est loin ? ... 457
3. Caractéristiques d'une lunette afocale TP ... 458

19 Description de la lumière par un flux de photons P ... 476

ACTIVITÉS

1. Effet photoélectrique Classe inversée ... 478
2. Applications de l'interaction lumière-matière TP ... 479
3. Rendement d'une cellule photovoltaïque TP ... 480

SOMMAIRE

20 Dynamique d'un système électrique P 498

ACTIVITÉS

1. Capacité d'un condensateur 500
2. Comportement capacitif d'un dipôle TP 501
3. Flash photographique et condensateur TP 502
4. Mesurer un temps caractéristique et une capacité TP 503

Exercices de synthèse PRÉPA BAC 522

COMPLÉMENTS

FICHES MÉTHODE

1. Utiliser le logarithme décimal et sa réciproque MATHS 532
2. Résoudre une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants MATHS 533
3. Résoudre une équation du second degré MATHS 534
4. Dériver une fonction MATHS 535
5. Représentation paramétrique d'une courbe MATHS 536
6. Utiliser les puissances de 10 et la notation scientifique 537
7. Exprimer les incertitudes de mesure 538
8. Gérer les chiffres significatifs et la notation scientifique 542
9. Convertir des grandeurs 543
10. Réaliser une analyse dimensionnelle 544
11. Suivre l'évolution d'une transformation chimique 545
12. Ajuster une équation chimique 546
13. Écrire l'équation d'une réaction d'oxydoréduction 547
14. Représenter des molécules 548
15. Nommer les molécules organiques 550
16. Construire une représentation graphique 552
17. Représenter un vecteur vitesse 553
18. Représenter un vecteur accélération 554
19. Additionner des vecteurs/des forces 555
20. Utilisation de *phyphox* pour mesurer une vitesse par effet Doppler 556
21. Schématiser les principaux dipôles électriques 557

FICHES PRATIQUES

1. La sécurité au laboratoire 558
2. Utiliser un langage de programmation 560
3. Utiliser un microcontrôleur 562
4. Utiliser un tableur-grapheur 564
5. Utiliser sa calculatrice TI (83 Premium CE) 566
6. Utiliser sa calculatrice Casio (Graph 90+E) 567
7. Utiliser sa calculatrice Numworks 568
8. Connaître la verrerie de laboratoire 569
9. Préparer une solution de concentration donnée par dissolution 570
10. Préparer une solution de concentration donnée par dilution 571
11. Utiliser un pH-mètre 572
12. Utiliser un conductimètre 573
13. Réaliser un titrage direct 574
14. Réaliser un dosage par étalonnage 576
15. Réaliser un spectre d'absorption UV-visible 578
16. Réaliser une distillation ou un chauffage à reflux 579
17. Utiliser une ampoule à décanter 580
18. Réaliser une filtration 581
19. Réaliser une chromatographie 582
20. Réaliser une recristallisation 583
21. Mettre en œuvre un test d'identification d'espèces chimiques 584
22. Mesurer une température de fusion 585
23. Utiliser un logiciel de traitement de vidéos 586
24. Mesurer une pression 587
25. Mesurer un niveau d'intensité sonore 588
26. Réaliser un montage d'optique 589
27. Réaliser un circuit électrique 590
28. Utiliser un oscilloscope 591

Corrigés des exercices / Coups de pouce 592

LES RESSOURCES NUMÉRIQUES DU MANUEL

Votre manuel est accompagné de nombreuses ressources numériques. La plupart de ces ressources sont accessibles par l'application **Bordas Flashpage** (voir le rabat I de couverture) et le **manuel numérique**.

Les corrigés d'exercices sont aussi disponibles sur le **site ressources**, de même que les fichiers associés à des logiciels spécifiques.

bordas Flash PAGE

MANUEL NUMÉRIQUE ÉLÈVE

Site ressources
lycee.editions-bordas.fr



- 10 vidéos ECE

GESTE ECE n° 1

- 9 vidéos d'expériences ou documentaires
- 20 QCM interactifs
- Cartes mémos
- 32 animations en partenariat avec eduMedia
- Cours en podcast

DYS

- Corrigés détaillés d'exercices
- 35 fichiers Python, Arduino et tableur

Liste des vidéos GESTE ECE

1. Mettre en œuvre un dispositif de titrage avec suivi par conductimétrie
2. Mettre en œuvre un dispositif de titrage avec suivi par pH-métrie
3. Réaliser un dosage spectrophotométrique par étalonnage
4. Mettre en œuvre une synthèse avec chauffage à reflux
5. Mettre en œuvre une extraction liquide-liquide
6. Réaliser une filtration sous pression réduite et un lavage
7. Effectuer un enregistrement vidéo
8. Estimer la distance focale d'une lentille convergente
9. Mesurer une tension
10. Mesurer une intensité



LES COMPÉTENCES DE LA DÉMARCHE SCIENTIFIQUE APP ANA/RAI REA VAL COM

Cinq compétences spécifiques de la démarche scientifique sont travaillées et mobilisées dans les activités et exercices du manuel.

Ce sont ces compétences qui sont notamment évaluées aux **épreuves écrites du baccalauréat** et lors de l'**évaluation des compétences expérimentales** (ECE).

À chacune de ces compétences, on peut associer des savoir-faire ou **capacités**. Le tableau ci-dessous présente les 5 compétences, ainsi que des exemples de capacités à acquérir en physique-chimie. Vous les retrouverez tout au long du manuel.

- Une **compétence** correspond à un ensemble de connaissances, de savoir-faire et d'attitudes que vous allez utiliser pour résoudre un problème.
- Des exemples d'**attitudes** essentielles en sciences sont la curiosité, l'ouverture d'esprit, l'honnêteté face aux résultats...
- Le mot **capacité** est synonyme de savoir-faire.

Compétences	Exemples de capacités associées
S'approprier APP	• Énoncer une problématique. • Rechercher et organiser l'information en lien avec la problématique étudiée. • Schématiser une situation.
Analyser Raisonner ANA/RAI	• Formuler une hypothèse. • Proposer une stratégie de résolution. • Planifier des tâches. • Évaluer des ordres de grandeur. • Choisir un modèle ou des lois pertinentes. • Choisir, élaborer, justifier un protocole. • Faire des prévisions à l'aide d'un modèle. • Procéder à des analogies.
Réaliser REA	• Mettre en œuvre les étapes d'une démarche. • Utiliser un modèle. • Effectuer des procédures courantes (calculs, représentations, collectes de données, etc.). • Mettre en œuvre un protocole expérimental en respectant les règles de sécurité.
Valider VAL	• Faire preuve d'esprit critique, procéder à des tests de vraisemblance. • Identifier des sources d'erreur, estimer une incertitude, comparer à une valeur de référence. • Confronter un modèle à des résultats expérimentaux. • Proposer d'éventuelles améliorations de la démarche ou du modèle. • Interpréter des mesures.
Communiquer COM	À l'écrit comme à l'oral : • présenter une démarche de manière argumentée, synthétique et cohérente ; • utiliser un vocabulaire adapté et choisir des modèles de représentation appropriés ; • échanger entre pairs.



LES COMPÉTENCES DANS LE MANUEL

Le tableau ci-dessous indique, pour chaque chapitre, dans quelles activités et quels exercices chacune des compétences apparaît.

	S'approprier (APP)	Analyser/ Raisonner (AN/RAI)	Réaliser (RÉA)	Valider (VAL)	Communiquer (COM)
Chapitre 1	Activités 1, 2, 3 Exercice 41	Activité 2 Exercices 39, 40	Activité 2		Activité 3
Chapitre 2	Activités 2, 3 Exercice 41	Activités 2, 3 Exercices 39, 40	Activité 1		Activité 1
Chapitre 3	Activité 3 Exercice 38	Activité 1, 3 Exercices 36, 37	Activités 1, 2	Activité 2	
Chapitre 4	Activités 1, 2 Exercices 37, 39	Activités 2, 3 Exercice 38	Activités 1, 3, 4	Activité 4	
Chapitre 5	Activités 1, 2, 3, 4 Exercice 41	Exercices 39, 40		Activité 4	Activités 1, 2
Chapitre 6	Exercice 45	Exercices 43, 44	Activités 1, 2, 3	Activités 2, 3	
Chapitre 7	Exercice 42	Activité 3 Exercice 40	Activités 1, 2, 4 Exercice 41	Activités 1, 2, 3, 4	
Chapitre 8	Activité 2 Exercices 31, 32	Activité 1	Activité 2		Activité 1
Chapitre 9	Exercices 34, 35, 36	Activité 1 Exercice 35	Activités 1, 2, 3	Activités 2, 3	
Chapitre 10	Activité 3 Exercice 43	Activité 1 Exercice 44	Activités 1, 2	Activités 2, 3	Exercice 45
Chapitre 11	Activité 2	Exercices 45, 46, 47	Activités 1, 3, 4	Activités 1, 3, 4	Activité 2
Chapitre 12	Activité 1	Exercices 33, 34, 35	Activité 2, 3, 4	Activité 2, 3, 4	Activité 1
Chapitre 13	Activités 1, 2 Exercices 37, 38	Activités 1, 4 Exercices 37, 38, 39	Activités 2, 3, 4	Activité 3	
Chapitre 14		Exercices 38, 40	Activités 1, 2, 3, 4 Exercice 39	Activités 1, 2, 3	Activité 4
Chapitre 15	Activité 1	Activité 1 Exercices 37, 38	Activités 2, 3	Activités 2, 3	
Chapitre 16	Activité 1	Exercices 45, 46	Activités 2, 3, 4	Activités 2, 3, 4	Activité 1 Exercice 44
Chapitre 17		Activités 1, 3 Exercice 36	Activités 1, 2, 4, 5	Activités 2, 4, 5	Activité 3 Exercices 35, 37
Chapitre 18	Activités 1, 2, 3	Exercice 37 Exercice 37	Activités 1, 3	Activité 2	Exercices 38, 39
Chapitre 19	Activités 1, 2	Exercice 39	Activité 3	Activité 3	Activités 1, 2 Exercices 37, 38
Chapitre 20	Activité 2	Activité 1 Exercice 36	Activités 2, 3, 4 Exercice 38	Activités 1, 3 Exercice 37	Activité 4

LE PROGRAMME DE PHYSIQUE-CHIMIE Tle

(Extraits du Bulletin Officiel *spécial n° 8 du 25 juillet 2019)*

MESURE ET INCERTITUDES

Notions et contenus	Capacités exigibles
Variabilité de la mesure d'une grandeur physique. Incertitude-type. Incertitudes-types composées. Écriture du résultat. Valeur de référence.	Exploiter une série de mesures indépendantes d'une grandeur physique : histogramme, moyenne et écart-type. Discuter de l'influence de l'instrument de mesure et du protocole. Évaluer qualitativement la dispersion d'une série de mesures indépendantes. **Capacité numérique :** Représenter l'histogramme associé à une série de mesures à l'aide d'un tableur ou d'un langage de programmation. Définir qualitativement une incertitude-type. Procéder à l'évaluation d'une incertitude-type par une approche statistique (évaluation de type A). Procéder à l'évaluation d'une incertitude-type par une autre approche que statistique (évaluation de type B). Évaluer, à l'aide d'une formule fournie, l'incertitude-type d'une grandeur s'exprimant en fonction d'autres grandeurs dont les incertitudes-types associées sont connues. Capacité numérique : Simuler, à l'aide d'un langage de programmation, un processus aléatoire illustrant la détermination de la valeur d'une grandeur avec incertitudes-types composées. Écrire, avec un nombre adapté de chiffres significatifs, le résultat d'une mesure. Comparer, le cas échéant, le résultat d'une mesure m_{mes} à une valeur de référence m_{ref} en utilisant le quotient $\frac{mes - m_{ref}}{u(m)}$ où $u(m)$ est l'incertitude-type associée au résultat.

Fiche méthode 7

CONSTITUTION ET TRANSFORMATIONS DE LA MATIÈRE

1. Déterminer la composition d'un système par des méthodes physiques et chimiques

Notions et contenus	Capacités exigibles	
A) Modéliser des transformations acide-base par des transferts d'ion hydrogène H^+		
Transformation modélisée par des transferts d'ion hydrogène H^+ : acide et base de Brönsted, couple acide-base, réaction acide-base. Couples acide-base de l'eau, de l'acide carbonique, d'acides carboxyliques, d'amines. Espèce amphotère.	Identifier, à partir d'observations ou de données expérimentales, un transfert d'ion hydrogène, les couples acide-base mis en jeu et établir l'équation d'une réaction acide-base. Représenter le schéma de Lewis et la formule semi-développée d'un acide carboxylique, d'un ion carboxylate, d'une amine et d'un ion ammonium. Identifier le caractère amphotère d'une espèce chimique.	Chapitre 1
B) Analyser un système chimique par des méthodes physiques		
pH et relation, $pH = -\log([H_3O^+]/c^\circ)$ avec $c^\circ = 1\ mol \cdot L^{-1}$, concentration standard. Absorbance ; loi de Beer-Lambert. Conductance, conductivité ; loi de Kohlrausch. Spectroscopie infrarouge et UV-visible. Identification de groupes caractéristiques et d'espèces chimiques.	Déterminer, à partir de la valeur de la concentration en ion oxonium H_3O^+, la valeur du pH de la solution et inversement. *Mesurer le pH de solutions d'acide chlorhydrique (H_3O^+, Cl^-) obtenues par dilutions successives d'un facteur 10 pour tester la relation entre le pH et la concentration en ion oxonium H_3O^+ apporté.* **Capacité mathématique :** Utiliser la fonction logarithme décimal et sa réciproque. Exploiter la loi de Beer-Lambert, la loi de Kohlrausch ou l'équation d'état du gaz parfait pour déterminer une concentration ou une quantité de matière. Citer les domaines de validité de ces relations. *Mesurer une conductance et tracer une courbe d'étalonnage pour déterminer une concentration.* Exploiter, à partir de données tabulées, un spectre d'absorption infrarouge ou UV-visible pour identifier un groupe caractéristique ou une espèce chimique.	Chapitre 2
C) Analyser un système par des méthodes chimiques		
Titre massique et densité d'une solution. Titrage avec suivi pH-métrique. Titrage avec suivi conductimétrique.	*Réaliser une solution de concentration donnée en soluté apporté à partir d'une solution de titre massique et de densité fournis.* Établir la composition du système après ajout d'un volume de solution titrante, la transformation étant considérée comme totale. Exploiter un titrage pour déterminer une quantité de matière, une concentration ou une masse. Dans le cas d'un titrage avec suivi conductimétrique, justifier qualitativement l'évolution de la pente de la courbe à l'aide de données sur les conductivités ioniques molaires. *Mettre en œuvre le suivi pH-métrique d'un titrage ayant pour support une réaction acide-base. Mettre en œuvre le suivi conductimétrique d'un titrage.* **Capacité numérique :** Représenter, à l'aide d'un langage de programmation, l'évolution des quantités de matière des espèces en fonction du volume de solution titrante versé.	Chapitre 3

2. Modéliser l'évolution temporelle d'un système, siège d'une transformation

Notions et contenus	Capacités exigibles	
A) Suivre et modéliser l'évolution temporelle d'un système siège d'une transformation chimique		
Suivi temporel et modélisation macroscopique. Transformations lentes et rapides.	Justifier le choix d'un capteur de suivi temporel de l'évolution d'un système. Identifier, à partir de données expérimentales, des facteurs cinétiques. Citer les propriétés d'un catalyseur et identifier un catalyseur à partir de données expérimentales. *Mettre en évidence des facteurs cinétiques et l'effet d'un catalyseur.*	Chapitre 4

Facteurs cinétiques : température, concentration des réactifs. Catalyse, catalyseur. Vitesse volumique de disparition d'un réactif et d'apparition d'un produit. Temps de demi-réaction. Loi de vitesse d'ordre 1. Modélisation microscopique. Mécanisme réactionnel : acte élémentaire, intermédiaire réactionnel, formalisme de la flèche courbe. Modification du mécanisme par ajout d'un catalyseur. Interprétation microscopique de l'influence des facteurs cinétiques.	À partir de données expérimentales, déterminer une vitesse volumique de disparition d'un réactif, une vitesse volumique d'apparition d'un produit ou un temps de demi-réaction. *Mettre en œuvre une méthode physique pour suivre l'évolution d'une concentration et déterminer la vitesse volumique de formation d'un produit ou de disparition d'un réactif.* Identifier, à partir de données expérimentales, si l'évolution d'une concentration suit ou non une loi de vitesse d'ordre 1. **Capacité numérique :** À l'aide d'un langage de programmation et à partir de données expérimentales, tracer l'évolution temporelle d'une concentration, d'une vitesse volumique d'apparition ou de disparition et tester une relation donnée entre la vitesse volumique de disparition et la concentration d'un réactif. À partir d'un mécanisme réactionnel fourni, identifier un intermédiaire réactionnel, un catalyseur et établir l'équation de la réaction qu'il modélise au niveau microscopique. Représenter les flèches courbes d'un acte élémentaire, en justifiant leur sens. Interpréter l'influence des concentrations et de la température sur la vitesse d'un acte élémentaire, en termes de fréquence et d'efficacité des chocs entre entités.	Chapitre 4
B) Modéliser l'évolution temporelle d'un système, siège d'une transformation nucléaire		
Décroissance radioactive. Stabilité et instabilité des noyaux : diagramme (N,Z), radioactivité α et β, équation d'une réaction nucléaire, lois de conservation. Évolution temporelle d'une population de noyaux radioactifs ; constante radioactive ; loi de décroissance radioactive ; temps de demi-vie ; activité. Radioactivité γ. Radioactivité naturelle ; applications à la datation. Applications dans le domaine médical ; protection contre les rayonnements ionisants.	Déterminer, à partir d'un diagramme (N, Z), les isotopes radioactifs d'un élément. Utiliser des données et les lois de conservation pour écrire l'équation d'une réaction nucléaire et identifier le type de radioactivité. Établir l'expression de l'évolution temporelle de la population de noyaux radioactifs. Exploiter la loi et une courbe de décroissance radioactive. **Capacité mathématique :** Résoudre une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants. Expliquer le principe de la datation à l'aide de noyaux radioactifs et dater un événement. Citer quelques applications de la radioactivité dans le domaine médical. Citer des méthodes de protection contre les rayonnements ionisants et des facteurs d'influence de ces protections.	Chapitre 5
3 Prévoir l'état final d'un système, siège d'une transformation chimique		
A) Prévoir le sens de l'évolution spontanée d'un système chimique		
État final d'un système siège d'une transformation non totale : état d'équilibre chimique. Modèle de l'équilibre dynamique. Quotient de réaction Q_r. Système à l'équilibre chimique ; constante d'équilibre $K(T)$. Critère d'évolution spontanée d'un système hors équilibre chimique. Transformation spontanée modélisée par une réaction d'oxydo-réduction. Pile, demi-piles, pont salin ou membrane, tension à vide. Fonctionnement d'une pile ; réactions électrochimiques aux électrodes. Usure d'une pile, capacité électrique d'une pile. Oxydants et réducteurs usuels.	Relier le caractère non total d'une transformation à la présence, à l'état final du système, de tous les réactifs et de tous les produits. *Mettre en évidence la présence de tous les réactifs dans l'état final d'un système siège d'une transformation non totale, par un nouvel ajout de réactifs.* Déterminer le sens d'évolution spontanée d'un système. Déterminer un taux d'avancement final à partir de données sur la composition de l'état final et le relier au caractère total ou non total de la transformation. *Déterminer la valeur du quotient de réaction à l'état final d'un système, siège d'une transformation non totale, et montrer son indépendance vis-à-vis de la composition initiale du système à une température donnée. Illustrer un transfert spontané d'électrons par contact entre réactifs et par l'intermédiaire d'un circuit extérieur.* Justifier la stratégie de séparation des réactifs dans deux demi-piles et l'utilisation d'un pont salin. Modéliser et schématiser, à partir de résultats expérimentaux, le fonctionnement d'une pile. Déterminer la capacité électrique d'une pile à partir de sa constitution initiale. *Réaliser une pile, déterminer sa tension à vide et la polarité des électrodes, identifier la transformation mise en jeu, illustrer le rôle du pont salin.* Citer des oxydants et des réducteurs usuels : eau de Javel, dioxygène, dichlore, acide ascorbique, dihydrogène, métaux. Justifier le caractère réducteur des métaux du bloc s.	Chapitre 6
B) Comparer la force des acides et des bases		
Constante d'acidité K_a d'un couple acide-base, produit ionique de l'eau K_e. Réaction d'un acide ou d'une base avec l'eau, cas limite des acides forts et des bases fortes dans l'eau. Solutions courantes d'acides et de bases. Diagrammes de prédominance et de distribution d'un couple acide-base ; espèce prédominante, cas des indicateurs colorés et des acides alpha-aminés. Solution tampon.	Associer K_a et K_e aux équations de réactions correspondantes. *Estimer la valeur de la constante d'acidité d'un couple acide-base à l'aide d'une mesure de pH.* Associer le caractère fort d'un acide (d'une base) à la transformation quasi-totale de cet acide (cette base) avec l'eau. Prévoir la composition finale d'une solution aqueuse de concentration donnée en acide fort ou faible apporté. Comparer la force de différents acides ou de différentes bases dans l'eau. *Mesurer le pH de solutions d'acide ou de base de concentration donnée pour en déduire le caractère fort ou faible de l'acide ou de la base.* **Capacité numérique :** Déterminer, à l'aide d'un langage de programmation, le taux d'avancement final d'une transformation, modélisée par la réaction d'un acide sur l'eau. **Capacité mathématique :** Résoudre une équation du second degré. Citer des solutions aqueuses d'acides et de bases courantes et les formules des espèces dissoutes associées : acide chlorhydrique (H_3O^+ (aq), Cl^- (aq)), acide nitrique (H_3O^+ (aq), NO_3^- (aq)), acide éthanoïque (CH_3COOH (aq)), soude ou hydroxyde de sodium (Na^+ (aq), HO^- (aq)), ammoniac (NH_3 (aq)). Représenter le diagramme de prédominance d'un couple acide-base. Exploiter un diagramme de prédominance ou de distribution. Justifier le choix d'un indicateur coloré lors d'un titrage. **Capacité numérique :** Tracer, à l'aide d'un langage de programmation, le diagramme de distribution des espèces d'un couple acide-base de pK_a donné. Citer les propriétés d'une solution tampon.	Chapitre 7

C) Forcer le sens d'évolution d'un système		
Passage forcé d'un courant pour réaliser une transformation chimique. Constitution et fonctionnement d'un électrolyseur. Stockage et conversion d'énergie chimique.	Modéliser et schématiser, à partir de résultats expérimentaux, les transferts d'électrons aux électrodes par des réactions électrochimiques. Déterminer les variations de quantité de matière à partir de la durée de l'électrolyse et de la valeur de l'intensité du courant. *Identifier les produits formés lors du passage forcé d'un courant dans un électrolyseur. Relier la durée, l'intensité du courant et les quantités de matière de produits formés.* Citer des exemples de dispositifs mettant en jeu des conversions et stockages d'énergie chimique (piles, accumulateurs, organismes chlorophylliens) et les enjeux sociétaux associés.	Chapitre 8
4. Élaborer des stratégies en synthèse organique		
Structure et propriétés. Formule topologique. Familles fonctionnelles : esters, amines, amides et halogénoalcanes. Squelettes carbonés insaturés, cycliques. Isomérie de constitution. Polymères. **Optimisation d'une étape de synthèse.** Optimisation de la vitesse de formation d'un produit et du rendement d'une synthèse. Stratégie de synthèse multi-étapes. Modification de groupe caractéristique, modification de chaîne carbonée, polymérisation. Protection/déprotection. Synthèses écoresponsables.	Exploiter des règles de nomenclature fournies pour nommer une espèce chimique ou représenter l'entité associée. Représenter des formules topologiques d'isomères de constitution, à partir d'une formule brute ou semi- développée. Identifier le motif d'un polymère à partir de sa formule. Citer des polymères naturels et synthétiques et des utilisations courantes des polymères. Identifier, dans un protocole, les opérations réalisées pour optimiser la vitesse de formation d'un produit. Justifier l'augmentation du rendement d'une synthèse par introduction d'un excès d'un réactif ou par élimination d'un produit du milieu réactionnel. *Mettre en œuvre un protocole de synthèse pour étudier l'influence de la modification des conditions expérimentales sur le rendement ou la vitesse.* Élaborer une séquence réactionnelle de synthèse d'une espèce à partir d'une banque de réactions. Identifier des réactions d'oxydo-réduction, acide-base, de substitution, d'addition, d'élimination. Identifier des étapes de protection/déprotection et justifier leur intérêt, à partir d'une banque de réactions. *Mettre en œuvre un protocole de synthèse conduisant à la modification d'un groupe caractéristique ou d'une chaîne carbonée.* Discuter l'impact environnemental d'une synthèse et proposer des améliorations à l'aide de données fournies, par exemple en termes d'énergie, de formation et valorisation de sous-produits et de choix des réactifs et solvants.	Chapitre 9

MOUVEMENT ET INTERACTIONS

1. Décrire un mouvement		
Notions et contenus	**Capacités exigibles**	
Vecteurs position, vitesse et accélération d'un point. Coordonnées des vecteurs vitesse et accélération dans le repère de Frenet pour un mouvement circulaire. Mouvement rectiligne uniformément accéléré. Mouvement circulaire uniforme.	Définir le vecteur vitesse comme la dérivée du vecteur position par rapport au temps et le vecteur accélération comme la dérivée du vecteur vitesse par rapport au temps. Établir les coordonnées cartésiennes des vecteurs vitesse et accélération à partir des coordonnées du vecteur position et/ou du vecteur vitesse. Citer et exploiter les expressions des coordonnées des vecteurs vitesse et accélération dans le repère de Frenet, dans le cas d'un mouvement circulaire. Caractériser le vecteur accélération pour les mouvements suivants : rectiligne, rectiligne uniforme, rectiligne uniformément accéléré, circulaire, circulaire uniforme. *Réaliser et/ou exploiter une vidéo ou une chronophotographie pour déterminer les coordonnées du vecteur position en fonction du temps et en déduire les coordonnées approchées ou les représentations des vecteurs vitesse et accélération.* **Capacité numérique :** Représenter, à l'aide d'un langage de programmation, des vecteurs accélération d'un point lors d'un mouvement. **Capacité mathématique :** Dériver une fonction.	Chapitre 10
2. Relier les actions appliquées à un système à son mouvement		
Deuxième loi de Newton. Centre de masse d'un système. Référentiel galiléen. Deuxième loi de Newton. Équilibre d'un système.	Justifier qualitativement la position du centre de masse d'un système, cette position étant donnée. Discuter qualitativement du caractère galiléen d'un référentiel donné pour le mouvement étudié. Utiliser la deuxième loi de Newton dans des situations variées pour en déduire : le vecteur accélération du centre de masse, les forces appliquées au système étant connues ; la somme des forces appliquées au système, le mouvement du centre de masse étant connu.	Chapitre 11
Mouvement dans un champ uniforme. Mouvement dans un champ de pesanteur uniforme. Champ électrique créé par un condensateur plan. Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme. Principe de l'accélérateur linéaire de particules chargées. Aspects énergétiques.	Montrer que le mouvement dans un champ uniforme est plan. Établir et exploiter les équations horaires du mouvement. Établir l'équation de la trajectoire. Discuter de l'influence des grandeurs physiques sur les caractéristiques du champ électrique créé par un condensateur plan, son expression étant donnée. Décrire le principe d'un accélérateur linéaire de particules chargées. Exploiter la conservation de l'énergie mécanique ou le théorème de l'énergie cinétique dans le cas du mouvement dans un champ uniforme. *Utiliser des capteurs ou une vidéo pour déterminer les équations horaires du mouvement du centre de masse d'un système dans un champ uniforme. Étudier l'évolution des énergies cinétique, potentielle et mécanique.* **Capacité numérique :** Représenter, à partir de données expérimentales variées, l'évolution des grandeurs énergétiques d'un système en mouvement dans un champ uniforme à l'aide d'un langage de programmation ou d'un tableur. **Capacités mathématiques :** Résoudre une équation différentielle, déterminer la primitive d'une fonction, utiliser la représentation paramétrique d'une courbe.	Chapitre 12

Mouvement dans un champ de gravitation. Mouvement des satellites et des planètes. Orbite. Lois de Kepler. Période de révolution. Satellite géostationnaire.	Déterminer les caractéristiques des vecteurs vitesse et accélération du centre de masse d'un système en mouvement circulaire dans un champ de gravitation newtonien. Établir et exploiter la troisième loi de Kepler dans le cas du mouvement circulaire. **Capacité numérique** : Exploiter, à l'aide d'un langage de programmation, des données astronomiques ou satellitaires pour tester les deuxième et troisième lois de Kepler.	Chapitre 13
3. Modéliser l'écoulement d'un fluide		
Poussée d'Archimède. Écoulement d'un fluide en régime permanent. Débit volumique d'un fluide incompressible. Relation de Bernoulli. Effet Venturi.	Expliquer qualitativement l'origine de la poussée d'Archimède. Utiliser l'expression vectorielle de la poussée d'Archimède. *Mettre en œuvre un dispositif permettant de tester ou d'exploiter l'expression de la poussée d'Archimède.* Exploiter la conservation du débit volumique pour déterminer la vitesse d'un fluide incompressible. Exploiter la relation de Bernoulli, celle-ci étant fournie, pour étudier qualitativement puis quantitativement l'écoulement d'un fluide incompressible en régime permanent. *Mettre en œuvre un dispositif expérimental pour étudier l'écoulement permanent d'un fluide et pour tester la relation de Bernoulli.*	Chapitre 14

L'ÉNERGIE : CONVERSIONS ET TRANSFERTS

1. Décrire un système thermodynamique : exemple du modèle du gaz parfait		
Notions et contenus	**Capacités exigibles**	
Modèle du gaz parfait. Masse volumique, température thermodynamique, pression. Équation d'état du gaz parfait.	Relier qualitativement les valeurs des grandeurs macroscopiques mesurées aux propriétés du système à l'échelle microscopique. Exploiter l'équation d'état du gaz parfait pour décrire le comportement d'un gaz. Identifier quelques limites du modèle du gaz parfait.	Chapitre 15
2. Effectuer des bilans d'énergie sur un système : le premier principe de la thermodynamique		
Énergie interne d'un système. Aspects microscopiques. Premier principe de la thermodynamique. Transfert thermique, travail. Capacité thermique d'un système incompressible. Énergie interne d'un système incompressible. Modes de transfert thermique. Flux thermique. Résistance thermique. Bilan thermique du système Terre-atmosphère. Effet de serre. Loi phénoménologique de Newton, modélisation de l'évolution de la température d'un système au contact d'un thermostat.	Citer les différentes contributions microscopiques à l'énergie interne d'un système. Prévoir le sens d'un transfert thermique. Distinguer, dans un bilan d'énergie, le terme correspondant à la variation de l'énergie du système des termes correspondant à des transferts d'énergie entre le système et l'extérieur. Exploiter l'expression de la variation d'énergie interne d'un système incompressible en fonction de sa capacité thermique et de la variation de sa température pour effectuer un bilan énergétique. *Effectuer l'écarde énergétique d'un système thermodynamique.* Caractériser qualitativement les trois modes de transfert thermique : conduction, convection, rayonnement. Exploiter la relation entre flux thermique, résistance thermique et écart de température, l'expression de la résistance thermique étant donnée. Effectuer un bilan quantitatif d'énergie pour estimer la température terrestre moyenne, la loi de Stefan-Boltzmann étant donnée. Discuter qualitativement de l'influence de l'albédo et de l'effet de serre sur la température terrestre moyenne. Effectuer un bilan d'énergie pour un système incompressible échangeant de l'énergie par un transfert thermique modélisé à l'aide de la loi de Newton fournie. Établir l'expression de la température du système en fonction du temps. *Suivre et modéliser l'évolution de la température d'un système incompressible.* **Capacité mathématique** : Résoudre une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants avec un second membre constant.	Chapitre 16

ONDES ET SIGNAUX

1. Caractériser les phénomènes ondulatoires		
Notions et contenus	**Capacités exigibles**	
Intensité sonore, intensité sonore de référence, niveau d'intensité sonore. Atténuation (en dB). Diffraction d'une onde par une ouverture : conditions d'observation et caractéristiques. Angle caractéristique de diffraction. Interférences de deux ondes, conditions d'observation. Interférences constructives. Interférences destructives. Interférences de deux ondes lumineuses, différence de chemin optique, conditions d'interférences constructives ou destructives. Effet Doppler. Décalage Doppler.	Exploiter l'expression donnant le niveau d'intensité sonore d'un signal. *Illustrer l'atténuation géométrique et l'atténuation par absorption.* **Capacité mathématique** : Utiliser la fonction logarithme décimal et sa fonction réciproque. Caractériser le phénomène de diffraction dans des situations variées et en citer des conséquences concrètes. Exploiter la relation exprimant l'angle caractéristique de diffraction en fonction de la longueur d'onde et de la taille de l'ouverture. *Illustrer et caractériser qualitativement le phénomène de diffraction dans des situations variées. Exploiter la relation donnant l'angle caractéristique de diffraction dans le cas d'une onde lumineuse diffractée par une fente rectangulaire en utilisant éventuellement un logiciel de traitement d'image.* Caractériser le phénomène d'interférences de deux ondes et en citer des conséquences concrètes. Établir les conditions d'interférences constructives et destructives de deux ondes issues de deux sources ponctuelles en phase dans le cas d'un milieu de propagation homogène. *Tester les conditions d'interférences constructives ou destructives à la surface de l'eau dans le cas de deux ondes issues de deux sources ponctuelles en phase.* Prévoir les lieux d'interférences constructives et les lieux d'interférences destructives dans le cas des trous d'Young, l'expression linéarisée de la différence de chemin optique étant donnée. Établir l'expression de l'interfrange. *Exploiter l'expression donnée de l'interfrange dans le cas des interférences de deux ondes lumineuses, en utilisant éventuellement un logiciel de traitement d'image.*	Chapitre 17

	Capacité numérique : Représenter, à l'aide d'un langage de programmation, la somme de deux signaux sinusoïdaux périodiques synchrones en faisant varier la phase à l'origine de l'un des deux. Décrire et interpréter qualitativement les observations correspondant à une manifestation de l'effet Doppler. Établir l'expression du décalage Doppler dans le cas d'un observateur fixe, d'un émetteur mobile et dans une configuration à une dimension. Exploiter l'expression du décalage Doppler dans des situations variées utilisant des ondes acoustiques ou des ondes électromagnétiques. *Exploiter l'expression du décalage Doppler en acoustique pour déterminer une vitesse.*	Chapitre 17
2. Former des images, décrire la lumière par un flux de photons		
A) Former des images		
Notions et contenus	**Capacités exigibles**	
Modèle optique d'une lunette astronomique avec objectif et oculaire convergents. Grossissement.	Représenter le schéma d'une lunette afocale modélisée par deux lentilles minces convergentes ; identifier l'objectif et l'oculaire. Représenter le faisceau émergent issu d'un point objet situé « à l'infini » et traversant une lunette afocale. Établir l'expression du grossissement d'une lunette afocale. Exploiter les données caractéristiques d'une lunette commerciale. *Réaliser une maquette de lunette astronomique ou utiliser une lunette commerciale pour en déterminer le grossissement. Vérifier la position de l'image intermédiaire en la visualisant sur un écran.*	Chapitre 18
B) Décrire la lumière par un flux de photons		
Le photon : énergie, vitesse, masse. Effet photoélectrique. Travail d'extraction. Absorption et émission de photons. Enjeux énergétiques : rendement d'une cellule photovoltaïque.	Décrire l'effet photoélectrique, ses caractéristiques et son importance historique. *Interpréter qualitativement l'effet photoélectrique à l'aide du modèle particulaire de la lumière.* Établir, par un bilan d'énergie, la relation entre l'énergie cinétique des électrons et la fréquence. Expliquer qualitativement le fonctionnement d'une cellule photoélectrique. Citer quelques applications actuelles mettant en jeu l'interaction photon-matière (capteurs de lumière, cellules photovoltaïques, diodes électroluminescentes, spectroscopies UV-visible et IR, etc.). *Déterminer le rendement d'une cellule photovoltaïque.*	Chapitre 19
3. Étudier la dynamique d'un système électrique		
Intensité d'un courant électrique en régime variable. Comportement capacitif. Modèle du condensateur. Relation entre charge et tension ; capacité d'un condensateur. Modèle du circuit RC série : charge d'un condensateur par une source idéale de tension, décharge d'un condensateur, temps caractéristique. Capteurs capacitifs.	Relier l'intensité d'un courant électrique au débit de charges. Identifier des situations variées où il y a accumulation de charges de signes opposés sur des surfaces en regard. Citer des ordres de grandeur de valeurs de capacités usuelles. *Identifier et tester le comportement capacitif d'un dipôle. Illustrer qualitativement, par exemple à l'aide d'un microcontrôleur, d'un multimètre ou d'une carte d'acquisition, l'effet de la géométrie d'un condensateur sur la valeur de sa capacité.* Établir et résoudre l'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes d'un condensateur dans le cas de sa charge par une source idéale de tension et dans le cas de sa décharge. Expliquer le principe de fonctionnement de quelques capteurs capacitifs. *Étudier la réponse d'un dispositif modélisé par un dipôle RC. Déterminer le temps caractéristique d'un dipôle RC à l'aide d'un microcontrôleur, d'une carte d'acquisition ou d'un oscilloscope.* **Capacité mathématique :** Résoudre une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants avec un second membre constant.	Chapitre 20

CAPACITÉS EXPÉRIMENTALES

Ce paragraphe présente l'ensemble des capacités expérimentales qui doivent être acquises à l'issue des deux années d'enseignement de spécialité physique-chimie (première et terminale). Certaines, déjà présentes dans le programme de spécialité de première, voient leur maîtrise consolidée au cours de l'année de terminale. D'autres sont travaillées spécifiquement durant l'année de terminale. La liste qui suit indique ce que les élèves doivent savoir réaliser lors de l'épreuve pratique, à l'issue de leur formation conduite dans le cadre des « activités expérimentales support de la formation ». La présentation de ces capacités est organisée autour des thèmes du programme ; ces capacités peuvent être remobilisées lors de l'étude d'un autre thème du programme et certaines d'entre elles sont mises en œuvre plusieurs fois au cours de l'année. Elles se veulent au service, d'une part, de l'apprentissage des méthodes et concepts et, d'autre part, de l'acquisition des compétences de la démarche scientifique. Partie intégrante de l'activité de modélisation, cette maîtrise expérimentale relève principalement de la compétence « Réaliser » mais ne s'y limite pas.

Trois capacités expérimentales sont communes à l'ensemble des thèmes :
- respecter les règles de sécurité liées au travail en laboratoire ;
- mettre en œuvre un dispositif d'acquisition et de traitement de données : microcontrôleur, interface d'acquisition, tableur, langage de programmation ;
- utiliser un logiciel de simulation.

Constitution et transformations de la matière

- Préparer une solution par dissolution ou par dilution en choisissant le matériel adapté. ..... Fiches pratiques 9 et 10
- Réaliser le spectre d'absorption UV-visible d'une espèce chimique. ..... Fiche pratique 15
- Réaliser des mesures d'absorbance, de pH, de conductivité en s'aidant d'une notice. ..... Fiches pratiques 11, 12 et 15
- Mettre en œuvre un test de reconnaissance pour identifier une espèce chimique. ..... Fiche pratique 21
- Tracer une courbe d'étalonnage pour déterminer une concentration. ..... Fiche pratique 14
- Mettre en œuvre le protocole expérimental d'un titrage. ..... Fiche pratique 13
- Réaliser une pile et un circuit électrique intégrant un électrolyseur. ..... Chapitres 6 et 8
- Utiliser un logiciel de simulation de structures moléculaires et des modèles moléculaires. ..... Fiche méthode 14
- Mettre en œuvre une extraction liquide-liquide. ..... Fiche pratique 17
- Réaliser le montage des dispositifs de chauffage à reflux et de distillation fractionnée et les mettre en œuvre. ..... Fiche pratique 16
- Mettre en œuvre un dispositif pour estimer une température de changement d'état. ..... Fiche pratique 22
- Réaliser une filtration simple ou sous pression réduite, un lavage, un séchage. ..... Fiche pratique 18
- Réaliser une chromatographie sur couche mince. ..... Fiche pratique 19
- Respecter les règles de sécurité lors de l'utilisation de produits chimiques et de verrerie. ..... Fiche pratique 1
- Respecter le mode d'élimination d'une espèce chimique ou d'un mélange pour minimiser l'impact sur l'environnement. ..... Fiche pratique 1

Mouvement et interactions

- Mettre en œuvre un dispositif permettant d'illustrer l'interaction électrostatique. ..... Chapitre 12
- Utiliser un dispositif permettant de repérer la direction du champ électrostatique. ..... Chapitre 12
- Collecter des données sur un mouvement (vidéo, chronophotographie, etc.). ..... Fiche pratique 23
- Utiliser un dispositif permettant d'étudier la poussée d'Archimède. ..... Fiche pratique 24
- Mesurer une pression et une vitesse d'écoulement dans un gaz et dans un liquide. ..... Fiche pratique 24

L'énergie : conversions et transferts

- Utiliser un multimètre, adapter le calibre si nécessaire. ..... Fiche pratique 28
- Réaliser un montage électrique conformément à un schéma électrique normalisé. ..... Fiche pratique 27
- Mettre en œuvre un protocole permettant d'estimer une énergie transférée électriquement ou mécaniquement.
- Mettre en œuvre un dispositif pour réaliser un bilan énergétique et suivre l'évolution de la température d'un système. ..... Chapitre 16

Ondes et signaux

- Mettre en œuvre un dispositif expérimental permettant d'illustrer la propagation d'une perturbation mécanique. ..... Chapitre 17
- Mettre en œuvre un dispositif expérimental permettant de collecter des données sur la propagation d'une perturbation mécanique (vidéo, chronophotographie, etc.). ..... Chapitre 17
- Mettre en œuvre un dispositif permettant de mesurer la période, la longueur d'onde, la célérité d'une onde périodique. ..... Fiche pratique 29
- Commander la production d'un signal grâce à un microcontrôleur. ..... Fiche pratique 3
- Mesurer un niveau d'intensité sonore. ..... Fiche pratique 25
- Utiliser un luxmètre ou une photorésistance. ..... Chapitre 19
- Estimer la distance focale d'une lentille mince convergente.
- Réaliser un montage optique comportant une ou deux lentilles minces. ..... Fiche pratique 26
- Mettre en œuvre un dispositif pour illustrer la synthèse additive ou la synthèse soustractive.
- Mettre en œuvre un dispositif pour illustrer que la couleur apparente d'un objet dépend de la source de lumière.
- Mettre en œuvre un protocole expérimental permettant d'obtenir un spectre d'émission.
- Mettre en œuvre des dispositifs permettant d'étudier les phénomènes de diffraction et d'interférences.
- Mettre en œuvre un dispositif permettant d'étudier l'effet Doppler en acoustique. ..... Chapitre 18
- Utiliser une cellule photovoltaïque. ..... Chapitre 19
- Utiliser un oscilloscope. ..... Fiche pratique 29
- Réaliser un montage électrique pour étudier la charge et la décharge d'un condensateur dans un circuit RC. .. Chapitre 20
- Respecter les règles de sécurité préconisées lors de l'utilisation de sources lumineuses. ..... Fiche pratique 1
- Respecter les règles de sécurité préconisées lors de l'utilisation d'appareils électriques.

Avant d'aborder le chapitre

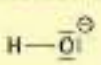
EN AUTONOMIE

LES ACQUIS INDISPENSABLES

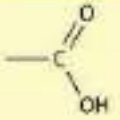
1re Enseignement de spécialité · Seconde · Cycle 4

- Un **ion hydrogène H^+** est un atome d'hydrogène qui a perdu son unique électron.
- Une **solution aqueuse** est une solution dont le solvant est l'eau.
- Dans la **formule semi-développée** d'une molécule, on représente les liaisons entre les atomes hormis celles mettant en jeu l'atome d'hydrogène.
- Sur le **schéma de Lewis** d'une entité chimique figurent les **doublets liants** et les **doublets non liants**, et pour un ion, la charge est notée **cerclée**, à côté du symbole de l'élément qui la porte.

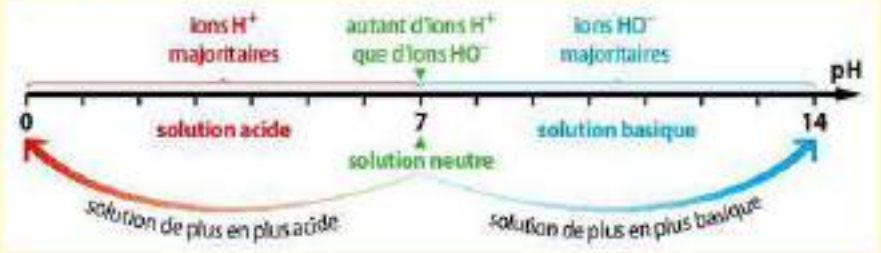
Exemple : schéma de Lewis de l'ion hydroxyde.



- La **famille** des acides carboxyliques possède le **groupe caractéristique carboxyle** :



- Le **pH** est un nombre sans unité qui, à 25 °C, varie de **0 à 14**, il exprime le **degré d'acidité ou de basicité** d'une solution.



POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

Pour chaque situation, rédiger une réponse qui explique en quelques lignes le raisonnement.

SITUATION 1

Pourquoi l'ion hydrogène est-il appelé aussi proton ?

SITUATION 2

Voici un extrait du tableau périodique :

H							He
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar

Établir le schéma de Lewis de l'ion hydrogène H^+ et de l'ion oxonium H_3O^+.

SITUATION 3

Le beurre rance et le parmesan dégagent une odeur forte et désagréable. La molécule responsable de cette odeur est l'acide butanoïque appelé aussi l'acide butyrique.

Quelle est la formule semi-développée de cette molécule ? Établir son schéma de Lewis.

CHAPITRE

1

CHIMIE

acide-base



Comment expliquer la formation des bulles qui apparaissent lorsqu'une rondelle de citron est plongée dans une eau riche en ions hydrogénocarbonate ?

→ EXERCICE 31

NOTIONS ET CONTENUS

- Définition des acides et des bases selon Brønsted.
- Couples acide-base.
- Transformations acide-base modélisées par des transferts d'ions hydrogène H^+.
- Caractère amphotère d'une espèce chimique.

COMPÉTENCES :
APP Rechercher et organiser l'information
ANA RAI Faire des prévisions à l'aide d'un modèle

Évolution des notions d'acide et de base

Il existe différentes définitions pour un acide et une base.
Suivant les réactifs en présence et le milieu d'étude, une définition sera plus adaptée qu'une autre.

DOC 1 Différentes définitions

Définition de Boyle

- Un acide a une saveur aigre. Il corrode les métaux et colore la teinture de tournesol (colorant extrait d'un lichen) en rouge. Lorsqu'il est mélangé à une base, il devient moins acide.
- Une base est visqueuse, elle colore la teinture de tournesol en bleu et devient moins basique lorsqu'elle est mélangée à un acide.



Robert Boyle (1627-1691), physicien, chimiste et philosophe irlandais.

1650

Définition de Brønsted

- Un acide est une espèce chimique capable de céder un proton H^+.
- Une base est une espèce chimique capable de capter un proton H^+.

Remarque : c'est cette définition qui sera utilisée en classe de terminale.



Johannes Nicolaus Brønsted (1879-1847), chimiste danois.

1923

Définition de Lewis

- Un acide est une espèce acceptant un doublet d'électrons.
- Une base est une espèce donnant un doublet d'électrons.



Gilbert Newton Lewis (1875-1946), physicien et chimiste américain, théoricien.

1884

Définition d'Arrhenius

- Un acide est une espèce chimique qui, **en solution aqueuse**, libère un ou plusieurs protons H^+.
- Une base est une espèce chimique qui, **en solution aqueuse**, libère un ou plusieurs ions hydroxyde HO^-.



Svante August Arrhenius (1859-1927), chimiste suédois, prix Nobel en 1903.

1939 **1947**

Définition de Lux et Flood

- Les acides sont des composés qui acceptent l'anion oxyde O^{2-}.
- Les bases sont des composés qui donnent l'anion oxyde O^{2-}.

Cette définition est utilisée notamment en métallurgie si le solvant est formé par des sels fondus.

Hermann Lux (1904-1999), chimiste allemand.
Hakon Flood (1905-2001), professeur de chimie norvégien.

EXPLOITATION ET ANALYSE

1 En quoi la définition de Boyle est-elle différente des autres définitions ?

2 a. Écrire les équations des réactions qui, selon Arrhenius, se produisent lorsque l'on met l'acide nitrique HNO_3 (ℓ) ou l'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$ (s) dans l'eau.

b. Donner un inconvénient de la définition d'Arrhenius.

3 Quels sont les points communs et les différences entre les définitions d'Arrhenius et de Brønsted ?

4 Écrire les équations qui, selon Brønsted, décrivent le comportement de l'acide ascorbique (ou vitamine C) $C_6H_8O_6$ et de l'ion carbonate, une base de formule CO_3^{2-}.

SYNTHÈSE

5 Pourquoi les définitions d'acide et de base ont-elles évolué au cours du temps ?

Je réussis si...

- **Je connais la définition d'un acide et d'une base selon Brønsted.**

2. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE

CLASSE INVERSÉE

COMPÉTENCES :
APP Rechercher et organiser l'information
RÉA Utiliser un modèle

Réaction acide-base

Comment modéliser une transformation chimique acide-base selon la définition de Brønsted ?

DOC 1 Observations expérimentales

Observation n° 1 :

Les vapeurs de chlorure d'hydrogène HCl et d'ammoniac NH_3 sont incolores, mais lorsqu'elles se mélangent, elles forment du chlorure d'ammonium NH_4Cl (s), sous forme de fumée blanche (photo).

Observation n° 2 :

Si l'on chauffe légèrement une solution obtenue en mélangeant des solutions aqueuses de chlorure d'ammonium (NH_4^+ (aq), Cl^- (aq)) et d'hydroxyde de sodium (Na^+ (aq), HO^- (aq)), on constate l'apparition d'une odeur désagréable, celle de l'ammoniac NH_3.



DOC 2 Transformation acide-base selon Brønsted

Un **acide** est une espèce chimique capable de céder un ion hydrogène H^+.

Une **base** est une espèce chimique capable de capter un ion hydrogène H^+.

En cédant un ion hydrogène H^+, un **acide** forme une base :

$$\text{acide} \rightarrow \text{base} + H^+$$

En captant un ion hydrogène H^+, une **base** forme un acide :

$$\text{base} + H^+ \rightarrow \text{acide}$$

Un couple **acide-base** est formé par deux espèces chimiques capables de se transformer l'une en l'autre par perte ou gain d'un ion hydrogène H^+. Ces deux formes sont reliées par une ***demi-équation acide-base*** :

$$\text{acide} = \text{base} + H^+$$

Une ***transformation chimique*** **acide-base** met en jeu deux espèces chimiques appartenant à ***deux couples acide-base différents*** : l'acide du premier couple cède un ion hydrogène H^+ à la base du second couple.

Pour établir l'***équation de réaction d'une transformation acide-base***, il faut écrire les deux demi-équations acide-base des deux couples mis en jeu et les ajouter.

EXPLOITATION ET ANALYSE

1 Observation n° 1

a. Quels sont les réactifs de la réaction décrite ? Préciser leur état physique et identifier l'espèce chimique qui joue le rôle de l'acide et celle qui joue le rôle de la base.

b. Écrire les deux couples acide-base mis en jeu et en déduire les deux demi-équations acide-base.

c. Établir l'équation de la réaction acide-base décrite.

VOCABULAIRE

- **Ion spectateur** : ion qui ne participe pas à la réaction chimique.
- **Modéliser** : représenter de façon simplifiée.

2 Observation n° 2

Sachant que les ions chlorure Cl^- (aq) et les ions sodium Na^+ (aq) sont des **ions spectateurs** et que le produit obtenu se forme initialement en phase aqueuse, reprendre les questions 1 a à c.

3

Comment peut-on expliquer l'apparition de l'odeur d'ammoniac ?

Je réussis si...

- **Je suis capable d'identifier un transfert d'ion hydrogène H^+.**
- **Je sais écrire les couples acide-base mis en jeu lors d'une réaction acide-base.**
- **Je sais établir l'équation d'une réaction acide-base.**

SYNTHÈSE

4

a. Expliquer pourquoi une demi-équation acide-base s'écrit avec un signe =.

b. Comment **modéliser** une transformation acide-base ?

COMPÉTENCES :
APP Rechercher et organiser l'information
COM Présenter une démarche de manière argumentée

Schéma de Lewis d'un couple acide-base

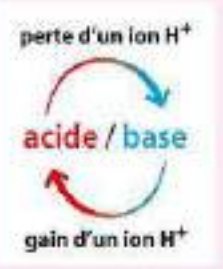
LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

Selon la définition de Brønsted, un couple acide-base est formé par deux espèces chimiques capables de se transformer l'une en l'autre par perte ou gain d'un ion hydrogène H^+.
Ces deux formes sont reliées par une demi-équation acide-base :

acide = base + H^+

l'acide et la base sont dits conjugués l'un de l'autre.

Comment passer de la représentation de Lewis de la forme acide d'un couple à celle de sa base conjuguée et inversement ?



COUP DE POUCE ➡ p. 593

DOC 1 L'acide méthanoïque

Certaines espèces de fourmis attaquent et se défendent en projetant un jet incolore d'acide méthanoïque liquide, appelé couramment acide formique, de formule brute CH_2O_2.
Cet acide est le plus simple des acides carboxyliques.
L'acide méthanoïque est un acide car son groupe carboxyle est capable de perdre un ion hydrogène H^+.
Sa base conjuguée est l'ion méthanoate.

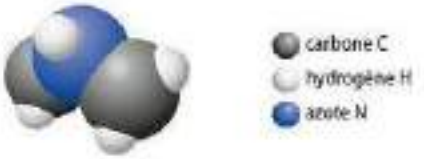


DOC 2 Les amines

Les amines sont des molécules azotées, obtenues par remplacement de 1, 2 ou 3 atome(s) d'hydrogène de l'ammoniac NH_3 par 1, 2 ou 3 groupe(s) alkyle(s) R.
Grâce au doublet non liant porté par l'atome d'azote N, les amines sont des espèces capables de capter un ion H^+.

DOC 3 La N-méthylméthanamine

La N-méthylméthanamine de formule $(CH_3)_2NH$ appartient à la famille des amines.



À température ambiante, cette amine est un gaz qui possède une odeur très désagréable.
Son espèce conjuguée est l'ion N-méthylméthanammonium.

DOC 4 Extrait du tableau périodique

1 H							2 He
3 Li	4 Be		5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg		13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar

Je réussis si...

- **je sais représenter le schéma de Lewis et la formule développée des couples acide-base d'acides carboxyliques et d'amines.**

1 Les acides et les bases

Définitions

En 1923, le chimiste danois Johannes Brønsted propose une définition d'un acide et d'une base.

Un **acide** est une espèce chimique capable de **céder** un **ion hydrogène** H^+ (ou proton).

EXEMPLE

CH_3CO_2H (aq) → $CH_3CO_2^-$ (aq) + H^+

acide éthanoïque — ion éthanoate — ion hydrogène

L'acide éthanoïque est un **acide** car il est capable de céder un ion hydrogène H^+.

Une **base** est une espèce chimique capable de **capter** un **ion hydrogène** H^+ (ou proton).

EXEMPLE

$CH_3CO_2^-$ (aq) + H^+ → CH_3CO_2H (aq)

ion éthanoate — ion hydrogène — acide éthanoïque

L'ion éthanoate est une **base** car il est capable de capter un ion hydrogène H^+.

Les écritures dans les deux exemples précédents ne correspondent pas à des équations de réactions car l'ion hydrogène H^+ **n'existe pas à l'état libre en solution** (FIG. 1). Ces **écritures** sont dites **formelles**, elles mettent simplement en évidence la libération ou la capture, c'est-à-dire le **transfert** d'un ion hydrogène H^+.

Il ne faut pas confondre un **acide** et une **solution acide**. En effet, une solution dans laquelle on introduit une espèce chimique acide peut être acide ou basique selon la quantité introduite et la nature des autres espèces chimiques déjà présentes en solution.

RAPPELS

- Une solution est **acide** si elle contient plus d'ions H_3O^+ (aq) que d'ions HO^- (aq).
- Une solution est **basique** si elle contient moins d'ions H_3O^+ (aq) que d'ions HO^- (aq).
- Une solution est **neutre** si elle contient autant d'ions H_3O^+ (aq) que d'ions HO^- (aq).



L'ion hydrogène H^+ n'existe pas à l'état libre dans l'eau, mais est à l'**état hydraté**. Une molécule d'eau H_2O se fixe sur l'ion H^+ pour former un **ion oxonium** H_3O^+ :

$H^+ + H_2O(\ell) \rightarrow H_3O^+$ (aq)

FIG. 1 Modèle moléculaire de l'ion oxonium H_3O^+ (aq).

Couple acide-base

Les notions d'acide (noté **AH**) et de base (notée A^-) sont **indissociables** :
- un acide **AH** forme une base A^- en cédant un ion H^+ ;
- une base A^- forme un acide **AH** en captant un ion H^+.

Deux espèces chimiques **AH** et A^- qui se transforment, au cours d'une réaction chimique, **l'une en l'autre** par échange **d'un ion hydrogène** H^+ sont dites **conjuguées** et forment un **couple acide-base**, noté **AH / A^-** (FIG. 2).

Le comportement d'un couple acide-base **AH / A^-** est décrit par cette **demi-équation acide-base** :

$AH = A^- + H^+$



FIG. 2 Représentation d'un couple acide-base.

EXEMPLE

CH_3CO_2H (aq) = $CH_3CO_2^-$ (aq) + H^+

acide éthanoïque — ion éthanoate

Cette demi-équation acide-base traduit la possibilité de passer de l'acide éthanoïque à l'ion éthanoate (lecture de la gauche vers la droite) et inversement (lecture de la droite vers la gauche). Ces deux espèces forment le couple acide-base CH_3CO_2H (aq) / $CH_3CO_2^-$ (aq).

■ On peut aussi écrire un couple acide-base : BH^+ / B et la demi-équation acide-base est :

$$BH^+ = B + H^+$$

EXEMPLE

Pour le couple NH_4^+ (aq) / NH_3 (aq), la demi-équation acide-base s'écrit :

$$NH_4^+ (aq) = NH_3 (aq) + H^+$$

2 Quelques couples acide-base

Couples de l'eau

L'eau H_2O appartient à deux couples (FIG. 3) :
– le couple H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ) où elle joue le rôle de la base ;
– le couple H_2O (ℓ) / HO^- (aq) où elle joue le rôle de l'acide.

■ Dans le couple H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ), l'**ion oxonium** H_3O^+ (aq) est un **acide**, il est capable de céder un ion H^+ :

$$H_3O^+ (aq) = H_2O (\ell) + H^+$$

■ Dans le couple H_2O (ℓ) / HO^- (aq), l'**ion hydroxyde** HO^- (aq) est une **base**, il est capable de capter un ion H^+ :

$$HO^- (aq) + H^+ = H_2O (\ell)$$

Suivant les espèces chimiques présentes, l'eau se comporte soit comme un acide, soit comme une base : on dit que l'eau est une **espèce amphotère**.

Couple de l'acide carbonique

■ Le dioxyde de carbone gazeux CO_2 **(g)** présent dans l'atmosphère est très soluble dans l'eau.

Le dioxyde de carbone solubilisé CO_2 **(aq)** peut réagir avec l'eau pour former de l'**acide carbonique** H_2CO_3 **(aq)** :

$$CO_2 (aq) + H_2O (\ell) \rightarrow H_2CO_3 (aq)$$

Cependant, la molécule d'acide carbonique H_2CO_3 (aq) **n'est pas très stable** dans l'eau, elle se déshydrate très facilement pour redonner du CO_2 (aq) et H_2O (ℓ) :

$$H_2CO_3 (aq) \rightarrow CO_2 (aq) + H_2O (\ell)$$

On préférera donc la notation CO_2 **(aq)**, H_2O **(ℓ)** à la notation H_2CO_3 **(aq)**.

Le dioxyde de carbone dissout dans l'eau, noté CO_2 **(aq)**, H_2O **(ℓ)**, et l'ion hydrogénocarbonate HCO_3^- **(aq)** forment un couple acide-base :

$$CO_2 (aq), H_2O (\ell) / HCO_3^- (aq)$$

■ La demi-équation acide-base de ce couple s'écrit :

$$CO_2 (aq), H_2O (\ell) = HCO_3^- (aq) + H^+$$

■ On peut remarquer que l'ion hydrogénocarbonate HCO_3^- (aq) peut libérer un ion H^+ pour donner l'ion **carbonate** CO_3^{2-} (aq) selon la demi-équation :

$$HCO_3^- (aq) = CO_3^{2-} (aq) + H^+$$

Le couple acide-base considéré ici est : HCO_3^- (aq) / CO_3^{2-} (aq).

L'**ion hydrogénocarbonate** HCO_3^- (aq) appartient à **deux couples** :

– le couple CO_2 (aq), H_2O (ℓ) / HCO_3^- **(aq)** où il joue le rôle de la **base** ;

– le couple HCO_3^- **(aq)** / CO_3^{2-} (aq) où il joue le rôle de l'**acide**.

L'ion hydrogénocarbonate HCO_3^- (aq) est une espèce **amphotère**.

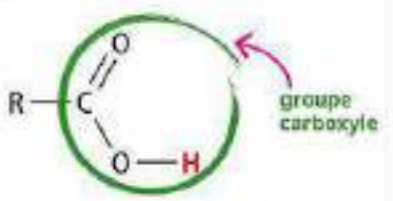
acide	base
HCl (g) / Cl^- (aq)	
chlorure d'hydrogène	ion chlorure
HNO_3 (ℓ) / NO_3^- (aq)	
acide nitrique	ion nitrate
H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ)	
ion oxonium	eau
H_2O (ℓ) / HO^- (aq)	
eau	ion hydroxyde
CH_3CO_2H (aq) / $CH_3CO_2^-$ (aq)	
acide éthanoïque	ion éthanoate
$C_6H_5CO_2H$ (aq) / $C_6H_5CO_2^-$ (aq)	
acide benzoïque	ion benzoate
NH_4^+ (aq) / NH_3 (aq)	
ion ammonium	ammoniac
CO_2 (aq), H_2O (ℓ) / HCO_3^- (aq)	
dioxyde de carbone dissout dans l'eau	ion hydrogénocarbonate

FIG. 3 Exemples de couples acide-base dont les deux couples de l'eau.

Couples des acides carboxyliques

Un **acide carboxylique** (FIG. 4) de formule RCO_2H (aq) cède un ion hydrogène H^+ pour former un **ion carboxylate** RCO_2^- (aq) :

$$RCO_2H\,(aq) = RCO_2^-\,(aq) + H^+$$

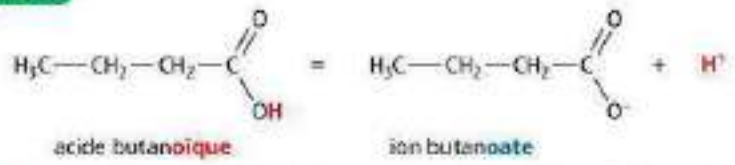


R est un groupe **alkyle** $-C_nH_{2n+1}$ ou un atome d'hydrogène **H**.

FIG. 4 Formule semi-développée des acides carboxyliques.

■ Le nom de la **base conjuguée**, l'ion carboxylate, s'obtient en supprimant le mot acide et en remplaçant la terminaison **-oïque** du nom de l'acide par la terminaison **-oate**.

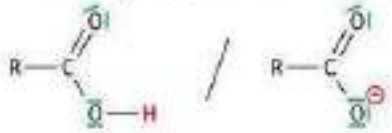
EXEMPLE



acide butanoïque ion butanoate

■ Dans un acide carboxylique, l'atome d'hydrogène **H** est relié à un atome d'oxygène **O** (FIG. 4). L'électronégativité de l'oxygène est supérieure à celle de l'hydrogène, l'oxygène a tendance à attirer le doublet d'électrons de la liaison covalente O—H, ce qui incite l'hydrogène **H** à quitter la molécule d'acide en « laissant son électron » et il forme ainsi l'ion H^+. Le **doublet liant** de l'oxygène se transforme alors en **doublet non liant**, l'oxygène se retrouve avec un électron en plus, il porte par conséquent une **charge négative.**

On peut représenter ainsi les schémas de Lewis du couple acide-base acide carboxylique / ion carboxylate, en utilisant le tableau ci-contre (FIG. 5).



Atome	Z	Nombre de doublets	
		liants	non liants
H	1	1	0
C	6	4	0
N	7	3	1
O	8	2	2

FIG. 5 Nombre de doublets liants et non liants de quelques atomes.

Couples des amines

Les **amines** (FIG. 6) sont des molécules azotées, obtenues par remplacement de 1, 2 ou 3 atome(s) d'hydrogène de l'ammoniac NH_3 par 1, 2 ou 3 groupe(s) **alkyle(s) R** (FICHE MÉTHODE ➡ p. 550).

■ Grâce au **doublet non liant** porté par l'atome d'azote N (FIG. 5), les amines sont des espèces capables de capter un ion H^+, les amines sont donc des **bases.**

Lorsqu'une amine capte un ion H^+, le **doublet non liant** porté par l'azote N se transforme en **doublet liant**, l'azote N se retrouve alors avec un électron en moins sur sa couche externe, il porte par conséquent une **charge positive.**

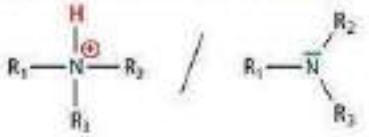
■ Le nom de l'**acide conjugué** s'obtient en remplaçant la terminaison **-amine** du nom de l'amine par la terminaison **-ammonium**.

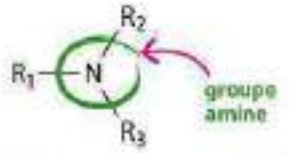
EXEMPLE



méthanamine **ion méthanammonium**

On peut représenter ainsi les schémas de Lewis du couple acide-base ion ammonium / amine, en utilisant le tableau (FIG. 5).





R_1, R_2 et R_3 sont des groupes **alkyles** $-C_nH_{2n+1}$ ou des atomes **H**.

FIG. 6 Formule semi-développée des amines.

3 Les réactions acide-base

Une **transformation chimique acide-base** met en jeu deux espèces chimiques appartenant à **deux couples** acide-base différents : l'acide A_1H du premier couple cède un ion hydrogène H^+ à la base du second couple A_2^- (FIG. 7).
On peut donc modéliser une transformation acide-base par un **transfert d'ion hydrogène H^+**.

Les deux couples mis en jeu :
couple 1 : A_1H / A_1^- (acide 1 / base 1)
couple 2 : A_2H / A_2^- (acide 2 / base 2)

FIG. 7 Identification des **réactifs** dans les couples mis en jeu lors d'une réaction acide-base.

Comment établir l'équation d'une réaction acide-base ?

- Identifier les deux couples mis en jeu (FIG. 7).
- Repérer dans chaque couple les **réactifs** de la réaction.
- Écrire les deux demi-équations acide-base dans le sens de la réaction.
- Additionner les deux demi-équations acide-base.

$$A_1H = A_1^- + H^+$$
$$A_2^- + H^+ = A_2H$$
$$A_1H + A_2^- + \cancel{H^+} \rightleftharpoons A_1^- + \cancel{H^+} + A_2H$$
(acide 1 ; base 2 ; base 1 ; acide 2)

L'ion hydrogène H^+ échangé n'apparaît donc pas dans l'équation de réaction.
Finalement, l'équation de la réaction s'écrit :

$$A_1H + A_2^- \rightleftharpoons A_1^- + A_2H$$
(acide 1 ; base 2 ; base 1 ; acide 2)

L'équation modélise bien le transfert d'ion hydrogène H^+ entre l'acide A_1H et la base A_2^-.

Ici, la **double flèche** indique que la transformation n'est pas toujours totale.

EXEMPLE 1

L'acide éthanoïque qui appartient au couple CH_3CO_2H (aq) / $CH_3CO_2^-$ (aq) peut réagir avec l'eau.
L'eau H_2O (ℓ) appartient à deux couples acide-base, il faut donc choisir ici celui dans lequel l'eau joue le rôle de **la base**, c'est-à-dire le couple H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ) (FIG. 8).

$$CH_3CO_2H\ (aq) = CH_3CO_2^-\ (aq) + H^+$$
$$H_2O\ (\ell) + H^+ = H_3O^+\ (aq)$$
$$CH_3CO_2H\ (aq) + H_2O\ (\ell) \rightleftharpoons CH_3CO_2^-\ (aq) + H_3O^+\ (aq)$$

Dans ce cas, la réaction n'est pas totale.

Les deux couples mis en jeu :
CH_3CO_2H (aq) / $CH_3CO_2^-$ (aq) (acide 1 / base 1)
H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ) (acide 2 / base 2)

FIG. 8 Les deux couples mis en jeu dans la réaction entre l'acide éthanoïque et l'eau.

EXEMPLE 2

Le chlorure d'hydrogène gazeux HCl (g) est un **acide** qui appartient au couple **HCl (g) / Cl^- (aq)**.
Il peut aussi réagir avec l'eau :

$$HCl\ (g) = Cl^-\ (aq) + H^+$$
$$H_2O\ (\ell) + H^+ = H_3O^+\ (aq)$$
$$HCl\ (g) + H_2O\ (\ell) \rightarrow Cl^-\ (aq) + H_3O^+\ (aq)$$

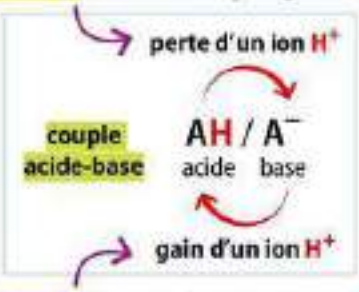
Dans ce cas, la réaction est totale.

Les deux couples mis en jeu :
HCl (g) / Cl^- (aq) (acide 1 / base 1)
H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ) (acide 2 / base 2)

FIG. 9 Les deux couples mis en jeu dans la réaction entre le chlorure d'hydrogène et l'eau.

1 Les acides et les bases

- Un **acide AH** cède un ion hydrogène H^+.



- Une **base A^-** capte un ion hydrogène H^+.
- La demi-équation acide-base s'écrit :

$$AH = A^- + H^+$$

2 Quelques couples acide-base

- **Couples de l'eau :**

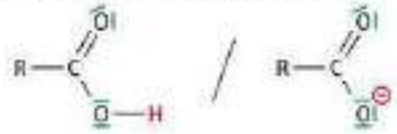
H_2O (ℓ) / HO^- (aq)
eau (acide) — ion hydroxyde (base)

H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ)
ion oxonium (acide) — eau (base)

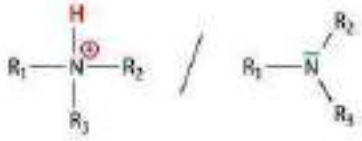
- **Couple de l'acide carbonique :**

CO_2 (aq), H_2O (ℓ) / HCO_3^- (aq)
dioxyde de carbone dissout dans l'eau (acide) — ion hydrogénocarbonate (base)

- **Couples des acides carboxyliques :**



- **Couples des amines :**



- Une espèce chimique **amphotère** se comporte soit comme un acide, soit comme une base, en fonction des espèces chimiques présentes.

Exemples :

• **L'eau** est une espèce amphotère, elle joue le rôle de l'acide dans un couple et le rôle de la base dans un autre :

H_2O (ℓ) / HO^- (aq)
(acide) (base)

H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ)
(acide) (base)

• L'ion **hydrogénocarbonate** est aussi une espèce amphotère :

CO_2 (aq), H_2O (ℓ) / HCO_3^- (aq)
(acide) (base)

HCO_3^- (aq) / CO_3^{2-} (aq)
(acide) (base)

3 Les réactions acide-base

- Une **transformation chimique acide-base** met en jeu deux espèces chimiques appartenant à **deux couples** acide-base différents : l'acide A_1H du premier couple cède un ion hydrogène H^+ à la base du second couple A_2^-.
On peut donc modéliser une transformation acide-base par un **transfert d'ion hydrogène H^+**.

- Comment établir l'équation d'une réaction acide-base ?
– identifier les deux couples mis en jeu ;
– repérer dans chaque couple les réactifs de la réaction ;
– écrire les deux demi-équations acide-base dans le sens de la réaction ;
– additionner les deux demi-équations acide-base.

- Soit une réaction où les deux **couples acide-base** mis en jeu sont :

couple 1 : A_1H / A_1^- (acide 1 / base 1)

couple 2 : A_2H / A_2^- (acide 2 / base 2)

- L'**équation de la réaction acide-base** s'écrit :

$$A_1H = A_1^- + H^+$$
$$A_2^- + H^+ = A_2H$$

$$A_1H + A_2^- \rightleftharpoons A_1^- + A_2H$$
acide 1 — base 2 — base 1 — acide 2

La double flèche indique que la réaction n'est pas toujours totale.

Vérifier l'essentiel

EN AUTONOMIE

Pour chaque question, choisir la ou les bonnes réponses. ➡ SOLUTIONS EN PAGE 593

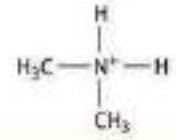
Flash PAGE corrigés détaillés

Flash PAGE QCM interactifs

1 Les acides et les bases

	A	B	C
1 Un acide, selon la définition de Brønsted, est une espèce chimique qui peut :	capter un ion hydrogène H^+.	céder un ion hydrogène H^+.	céder un ion hydroxyde HO^-.
2 L'acide méthanoïque HCO_2H (aq) est un acide. Sa base conjuguée est :	l'ion $HCO_2H_2^+$ (aq).	l'ion HCO_2^+ (aq).	l'ion HCO_2^- (aq).
3 L'ammoniac NH_3 (aq) est une base. L'ammoniac appartient au couple :	NH_3 (aq) / NH_2^+ (aq)	NH_4^+ (aq) / NH_3 (aq)	NH_2^- (aq) / NH_3 (aq)
4 La demi-équation acide-base associée au couple NH_3OH^+ (aq) / NH_2OH (aq) est :	NH_2OH (aq) + H^+ = NH_3OH^+ (aq)	NH_3OH^+ (aq) = NH_2OH (aq) + H^+	NH_2OH (aq) = NH_3OH^+ (aq) + H^+

2 Quelques couples acide-base

	A	B	C
5 Une espèce chimique amphotère :	n'est ni un acide, ni une base.	se comporte soit comme un acide, soit comme une base, en fonction des espèces chimiques présentes.	appartient à deux couples acide-base différents.
6 L'ion N-méthylméthanammonium $(CH_3)_2NH_2^+$ (aq) :	est un acide.	appartient au couple acide-base $(CH_3)_2NH_2^+$ (aq) / $(CH_3)_2NH$ (aq)	a pour formule semi-développée : 

3 Les réactions acide-base

	A	B	C
7 On considère la réaction entre l'acide méthanoïque HCO_2H (aq) et l'ammoniac NH_3 (aq). Les deux couples acide-base mis en jeu sont :	HCO_2H (aq) / HCO_2^- (aq) et NH_3 (aq) / NH_4^+ (aq)	HCO_2H (aq) / HCO_2^- (aq) et NH_4^+ (aq) / NH_3 (aq)	HCO_2^- (aq) / HCO_2H (aq) et NH_4^+ (aq) / NH_3 (aq)
8 L'équation de la réaction acide-base, supposée totale, décrite à la question 7, est :	HCO_2H (aq) + NH_4^+ (aq) ⇌ HCO_2^- (aq) + NH_3 (aq)	HCO_2H (aq) + NH_3 (aq) ⇌ HCO_2^- (aq) + NH_4^+ (aq)	HCO_2H (aq) + NH_3 (aq) → HCO_2^- (aq) + NH_4^+ (aq)
9 Soit l'équation de la réaction acide-base suivante : NH_3 (aq) + H_2O (ℓ) ⇌ NH_4^+ (aq) + HO^- (aq) Les couples acide-base mis en jeu sont :	NH_3 (aq) / H_2O (ℓ) et NH_4^+ (aq) / HO^- (aq)	NH_3 (aq) / NH_4^+ (aq) et H_2O (ℓ) / HO^- (aq)	NH_4^+ (aq) / NH_3 (aq) et H_2O (ℓ) / HO^- (aq)

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Acquérir les bases

1 Les acides et les bases

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Définir un couple acide-base selon la théorie de Brønsted.
- Écrire une demi-équation acide-base.

➥ Acquérir les bases : 10 ➥ S'entraîner : 29

10 Écriture d'une espèce conjuguée

1. Définir un acide et une base selon la théorie de Brønsted.
2. Recopier et compléter ce tableau pour former des couples acide-base conjugués.

Acide	H_3PO_4		ClOH		HS^-	NH_4^+
Base		HO^-		HS^-		

11 Vrais ou faux couples acide-base ?

1. Identifier les couples acide-base dans la liste ci-dessous.

H_2O_2 (aq) / H_2O (ℓ) H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ)

H_3O^+ (aq) / H_2O_2 (aq) H_2O (ℓ) / O_2 (aq)

H_2O (ℓ) / H_2 (aq) H_2O (ℓ) / HO^- (aq)

2. Écrire leur demi-équation acide-base.

12 La soude



L'hydroxyde de sodium est un solide ionique.

1. Quelle est sa formule ?
2. La dissolution dans l'eau de ce solide donne la soude. Écrire l'équation de dissolution.
3. Parmi les ions solvatés obtenus, lequel est une base selon la définition de Brønsted ?
4. À quel couple acide-base cet ion appartient-il ?

13 Un poison



Certains millepattes, pour se défendre, dégagent de l'acide cyanhydrique de formule HCN, un produit très toxique.

1. Écrire le couple acide-base de l'acide cyanhydrique.
2. Écrire la demi-équation acide-base associée au couple.

14 L'éthanoate de sodium

L'éthanoate de sodium est un solide ionique de formule CH_3CO_2Na (s). On le trouve dans les petites chaufferettes de poche.

1. Écrire l'équation de sa dissolution dans l'eau.
2. Parmi les ions solvatés obtenus, lequel est une base selon la définition de Brønsted ?
3. À quel couple acide-base cet ion appartient-il ?

2 Quelques couples acide-base

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Couples acide-base de l'eau, de l'acide carbonique, des acides carboxyliques, des amines

- Savoir représenter le schéma de Lewis et la formule semi-développée d'un acide carboxylique, d'un ion carboxylate, d'une amine, d'un ion ammonium.
- Écrire une demi-équation acide-base.

➥ Acquérir les bases : 12 13 ➥ S'entraîner : 27

Espèce amphotère

- Identifier le caractère amphotère d'une espèce chimique.

➥ Acquérir les bases : 14 15 ➥ S'entraîner : 31

DONNÉES

- Les numéros atomiques : consulter le tableau périodique, en rabat VI.
- Code couleurs des atomes : FICHE MÉTHODE ➥ p. 548

15 L'eau, une espèce amphotère

1. Écrire les couples acide-base de l'eau.
2. Pourquoi dit-on que l'eau est une espèce amphotère ?

16 L'ammoniac

La formule de l'ammoniac est NH_3.

1. L'ammoniac forme un premier couple acide-base avec l'ion ammonium NH_4^+.

Dans ce couple, l'ammoniac est-il un acide ou une base selon Brønsted ?

2. L'ammoniac forme un second couple acide-base avec l'ion amidure.

a. Dans ce second couple, l'ammoniac est-il un acide ou une base selon Brønsted ?

b. Quelle est la formule de l'ion amidure ?

3. Comment peut-on qualifier l'ammoniac ?

17 L'aniline



Ci-contre le modèle moléculaire compact de l'aniline, composé très utilisé dans la synthèse des colorants.

1. a. Écrire la formule brute et la formule semi-développée de cette molécule.

b. Entourer le groupe caractéristique et en déduire à quelle famille chimique cette molécule appartient.

c. Établir sa représentation de Lewis.

2. a. Cette molécule est-elle une base ou un acide selon la définition de Brønsted ? Justifier la réponse.

b. En déduire la formule semi-développée de son espèce conjuguée et établir sa représentation de Lewis.

18 L'ion hydrogénocarbonate

L'ion hydrogénocarbonate HCO_3^- (aq) appartient à deux couples acide-base.

1. Écrire les deux couples acide-base.
2. Comment qualifier l'ion HCO_3^- (aq) ?

19 L'acide malonique

L'acide malonique, appelé aussi l'acide propanedioïque, se présente sous forme de poudre cristalline blanche soluble dans l'eau.



1. Justifier le nom d'acide propanedioïque.
2. Écrire la formule semi-développée de cette molécule.
3. Pourquoi l'acide malonique est-il un diacide ?
4. Par perte d'un ion hydrogène H^+, l'acide malonique se transforme en ion hydrogénomalonate. Donner la représentation de Lewis de l'ion hydrogénomalonate.
5. À son tour, l'ion hydrogénomalonate peut perdre un ion hydrogène H^+ pour se transformer en ion malonate.

Donner la représentation de Lewis de l'ion malonate.

6. Parmi les espèces citées dans cet exercice, y a-t-il une espèce amphotère ? Justifier la réponse.

20 Produit de beauté



L'acide glycolique est très utilisé dans les produits de soins pour la peau. Il permet d'améliorer la texture et l'apparence de la peau et peut réduire les rides, l'acné ou l'hyperpigmentation.



1. Écrire la formule semi-développée de cette molécule.
2. Les propriétés acido-basiques de l'acide glycolique sont dues à l'hydrogène présent dans le groupe carboxyle.

En déduire la formule semi-développée de l'ion glycolate, son espèce conjuguée.

3. Établir la représentation de Lewis du couple acide-base de l'acide glycolique.

21 Un zwittérion

Les acides α-aminés sont des molécules qui, sur un même atome de carbone, possèdent un groupe carboxyle et un groupe amine.

L'alanine ci-dessous est l'un des acides α-aminés les plus simples.



1. Écrire la formule développée de cette molécule et entourer le groupe carboxyle ainsi que le groupe amine.
2. Rappeler, d'un point de vue acide-base, le rôle des deux groupes caractéristiques présents.
3. En solution aqueuse, l'alanine existe sous forme d'un zwittérion, c'est-à-dire une espèce chimique électriquement neutre, mais portant une charge positive et une charge négative. La formule de ce zwittérion est :

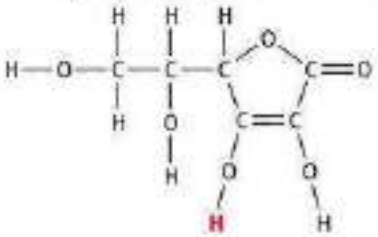
$$CH_3—CH(NH_3^+)COO^-$$

Comment peut-on expliquer la formation de cet ion ?

4. Donner la représentation de Lewis du zwittérion de l'alanine.
5. Quelle est la base conjuguée du zwittérion ?
6. Quelle est l'acide conjugué du zwittérion ?
7. Écrire les deux couples acide-base du zwittérion.
8. Comment peut-on qualifier le zwittérion ?

22 La vitamine C

La formule développée de l'acide ascorbique, ou vitamine C, est donnée ci-dessous. Ses propriétés acido-basiques sont dues à l'atome d'hydrogène représenté ici en rouge.



1. Donner la formule semi-développée de l'ion ascorbate, base conjuguée de l'acide ascorbique.
2. Établir la représentation de Lewis du couple acide-base.

3 Les réactions acide-base

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Identifier, à partir d'observations ou de données expérimentales, un transfert d'ion hydrogène, les couples acide-base mis en jeu.
- Établir l'équation d'une réaction acide-base.

Acquérir les bases : 23 25 — S'entraîner : 26 29

23 Des réactions acide-base

Voici une liste de couples acide-base :

CH_3CO_2H (aq) / $CH_3CO_2^-$ (aq) ; H_2O (ℓ) / HO^- (aq) ;

$CH_3NH_3^+$ (aq) / CH_3NH_2 (aq) ; H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ).

Base / Acide	$CH_3CO_2^-$ (aq)	CH_3NH_2 (aq)	H_2O (ℓ)	HO^- (aq)
CH_3CO_2H (aq)		4	7	10
$CH_3NH_3^+$ (aq)	1		8	11
H_3O^+ (aq)	2	5		12
H_2O (ℓ)	3	6	9	

Écrire, pour les cases numérotées de 1 à 12, l'équation de la réaction acide-base susceptible de se produire entre l'acide de la première colonne et la base de la première ligne.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

24 Le phosphate d'ammonium



Le phosphate d'ammonium est un engrais solide, soluble dans l'eau.

Données :

• *Couples acide-base :*

ion hydrogénophosphate HPO_4^{2-} (aq) / ion phosphate PO_4^{3-} (aq) ; ion ammonium NH_4^+ (aq) / ammoniac NH_3 (aq).

1. Quelle est sa formule brute ?
2. Écrire l'équation de dissolution du phosphate d'ammonium dans l'eau.
3. Montrer qu'une réaction acide-base peut se produire entre les ions constituant cet engrais.
4. Écrire l'équation acide-base associée à cette réaction.

25 Le chlorure d'hydroxylammonium

Le chlorure d'hydroxylammonium de formule NH_3OHCl (s) est un solide blanc qui, industriellement, est utilisé dans la synthèse des colorants et des produits pharmaceutiques.

Il est très soluble dans l'eau.

Données :

• *Couples acide-base : H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ) ; H_2O (ℓ) / HO^- (aq).*

1. Écrire l'équation de dissolution du chlorure d'hydroxylammonium dans l'eau.
2. L'ion hydroxylammonium est un acide selon la définition de Brønsted.

Écrire la formule de l'hydroxylamine, sa base conjuguée.

3. Écrire l'équation de la réaction acide-base entre l'ion hydroxylammonium et l'eau.
4. En déduire pourquoi une solution aqueuse de chlorure d'hydroxylammonium est une solution acide.
5. Écrire l'équation de la réaction acide-base entre l'hydroxylamine et l'eau.
6. En déduire pourquoi une solution aqueuse d'hydroxylamine est une solution basique.

26 Les brûlures d'estomac



Les brûlures d'estomac sont provoquées par le reflux gastro-œsophagien : des remontées d'acide chlorhydrique depuis l'estomac vers l'œsophage.

Le bicarbonate de soude (ou hydrogénocarbonate de sodium) neutralise l'acide chlorhydrique en le transformant en chlorure de sodium.

Le soulagement est immédiat et dure une trentaine de minutes environ.

Petit inconvénient de la réaction : elle produit également du gaz carbonique : CO_2.

Extrait du site www.e-sante.fr

Données :

• *Couples acide-base :*

H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ) ; CO_2 (g), H_2O (ℓ) / HCO_3^- (aq).

1. À l'état pur, l'hydrogénocarbonate de sodium est une poudre blanche. Écrire la formule du solide ionique.
2. Écrire l'équation de dissolution de l'hydrogénocarbonate de sodium dans l'eau.
3. Quels sont les ions présents dans l'acide chlorhydrique ? Parmi ces ions, quels sont ceux responsables des brûlures d'estomac ?
4. Montrer qu'une réaction acide-base peut se produire lorsqu'un patient souffrant de maux d'estomac ingère une solution d'hydrogénocarbonate de sodium.
5. Écrire l'équation acide-base associée à cette réaction et expliquer pourquoi les brûlures d'estomac disparaissent.
6. Quel renseignement supplémentaire l'équation écrite précédemment donne-t-elle ?
7. Expliquer la phrase : « Le bicarbonate de soude (ou hydrogénocarbonate de sodium) neutralise l'acide chlorhydrique en le transformant en chlorure de sodium. »

Faire le point avant d'aller plus loin

PRÉPA BAC

Pour vérifier ses connaissances, répondre aux questions suivantes (sans regarder le cours !)

Définir un acide et une base selon Brønsted.

Écrire l'équation de la réaction acide-base entre l'acide propanoïque et l'eau.

Écrire la demi-équation acide-base associée au couple de l'acide éthanoïque, et celle associée au couple NH_4^+ (aq) / NH_3 (aq).

Écrire la formule semi-développée et établir la représentation de Lewis du couple acide-base de l'éthanamine.

Expliquer pourquoi l'eau est une espèce amphotère.

Définir un couple acide-base.

CH_3CO_2H (aq) + $C_2H_5NH_2$ (aq) → $CH_3CO_2^-$ (aq) + $C_2H_5NH_3^+$ (aq)

Montrer que la réaction acide-base ci-dessus se modélise par un transfert d'ion hydrogène H^+ entre deux espèces appartenant à deux couples acide-base différents.

Identifier les deux couples acide-base mis en jeu dans la réaction d'équation :

$C_6H_5NH_2$ (aq) + H_2O (ℓ) ⇌ $C_6H_5NH_3^+$ (aq) + HO^- (aq)

Retrouver ces questions en version numérique

Exercice résolu EN AUTONOMIE

27 Représentation de Lewis d'un couple acide-base



Ci-contre le modèle éclaté de la N-éthyléthanamine, une molécule que l'on utilise dans la synthèse de la lidocaïne, un anesthésique local.

Données :

• Numéros atomiques Z de l'hydrogène, du carbone et de l'azote : Z(H) = 1, Z(C) = 6, Z(N) = 7.

1. a. Écrire la formule semi-développée de la N-éthyléthanamine.

b. Établir la représentation de Lewis de cette molécule.

2. Cette molécule est-elle un acide ou une base selon la définition de Brønsted ? **Justifier** la réponse.

3. En déduire la formule de son espèce conjuguée.

4. Expliquer comment établir le schéma de Lewis du couple acide-base associé à cette molécule.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- Le **modèle éclaté** permet de visualiser l'enchaînement des différents atomes dans la molécule.
- L'énoncé précise le **numéro atomique** de chaque atome composant la molécule.

LES VERBES D'ACTION

- **Justifier** : donner une explication au choix effectué.
- **En déduire** : intégrer le résultat précédent pour répondre.
- **Expliquer** : donner une justification à une observation ou une affirmation.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. a. La formule semi-développée est : $H_3C-CH_2-N(H)-CH_2-CH_3$

b. La représentation de Lewis est :



2. Cette molécule est une amine. La représentation de Lewis montre la présence d'un doublet **non liant** sur l'atome d'azote N. Grâce à ce doublet non liant, cette molécule est capable de **capter** un ion hydrogène H^+, c'est donc **une base** selon Brønsted.

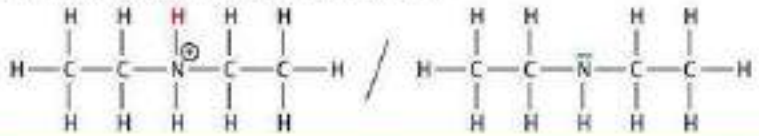
3. La demi-équation acide-base est :

$$(C_2H_5)_2NH + H^+ = (C_2H_5)_2NH_2^+$$

L'espèce conjuguée est un acide dont la formule est : $(C_2H_5)_2NH_2^+$.

4. Lorsque la base $(C_2H_5)_2NH$ capte l'ion H^+, pour former son acide conjugué, le doublet **non liant** porté par l'atome d'azote N se transforme en doublet liant afin de former une liaison covalente entre l'azote et l'hydrogène. L'azote N se retrouve alors avec un électron en moins et porte donc une charge positive.

Le schéma de Lewis du couple acide-base est :



QUELQUES CONSEILS

1. b. Dans la représentation de Lewis figurent les doublets liants et les doublets non liants.

3. Écrire la demi-équation acide-base pour trouver la formule de l'espèce conjuguée.

EXERCICE SIMILAIRE

28 Le couple de l'acide benzoïque

L'acide benzoïque est utilisé comme conservateur alimentaire, il est référencé en Europe sous le code E210.



Données :

• Numéros atomiques Z de l'hydrogène, du carbone et de l'oxygène : Z(H) = 1, Z(C) = 6, Z(O) = 8.

1. Écrire la formule semi-développée et établir la représentation de Lewis de cette molécule.

2. Quelle est la formule de son espèce conjuguée ?

3. Expliquer comment établir le schéma de Lewis du couple acide-base associé à cette molécule.

Exercice résolu EN AUTONOMIE

29 Éliminer les mauvaises odeurs du poisson



Les substances chimiques responsables de la mauvaise odeur du poisson sont des amines volatiles, comme la N,N-diméthylméthanamine de formule $(CH_3)_3N$.

Cette molécule est produite lors de la décomposition des protéines, à la mort du poisson. Elle est peu soluble dans l'eau, en revanche, son espèce conjuguée est soluble dans l'eau et non volatile.

Il existe de nombreuses recettes de grand-mère qui permettent d'atténuer et/ou de se débarrasser des mauvaises odeurs de poisson.

La plupart d'entre elles proposent d'ajouter quelques gouttes de citron ou de vinaigre dans la poêle, à l'eau de cuisson ou sur les mains.

1. Écrire le couple acide-base de la N,N-diméthylméthanamine.

2. Le vinaigre est une solution aqueuse qui contient de l'acide éthanoïque.

Écrire le couple acide-base de cet acide.

3. **Expliquer** le rôle du vinaigre. La transformation chimique considérée est supposée totale.

4. **En déduire** pourquoi le citron peut jouer le même rôle que le vinaigre.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- **Volatile** signifie que la molécule s'évapore facilement.
- Deux **espèces conjuguées** forment un couple acide-base.

LES VERBES D'ACTION

- **Expliquer** : donner une justification à une observation ou une affirmation.
- **En déduire** : intégrer le résultat précédent pour répondre.

QUELQUES CONSEILS

1. Déterminer le caractère acide ou basique de la molécule.
2. Identifier la famille à laquelle appartient l'acide éthanoïque.
3. Identifier les réactifs de la réaction dans les couples acide-base mis en jeu.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. Les amines sont des bases selon la définition de Brønsted car elles sont capables de capter un ion hydrogène H^+ grâce au doublet non liant porté par l'atome d'azote N. La N,N-diméthylméthanamine est donc **une base**. Elle appartient au couple : **$(CH_3)_3NH^+$ (aq) / $(CH_3)_3N$ (aq)**

2. L'acide éthanoïque est un acide carboxylique de formule CH_3CO_2H. Il appartient au couple acide-base : **CH_3CO_2H (aq) / $CH_3CO_2^-$ (aq)**

3. Les deux réactifs sont entourés en vert : $(CH_3)_3NH^+$ (aq) / $(CH_3)_3N$ (aq)
CH_3CO_2H (aq) / $CH_3CO_2^-$ (aq)

$$CH_3CO_2H\,(aq) = CH_3CO_2^-\,(aq) + H^+$$
$$(CH_3)_3N\,(aq) + H^+ = (CH_3)_3NH^+\,(aq)$$
$$CH_3CO_2H\,(aq) + (CH_3)_3N\,(aq) \rightarrow CH_3CO_2^-\,(aq) + (CH_3)_3NH^+\,(aq)$$

L'ajout de vinaigre permet de transformer $(CH_3)_3N$ (aq) en son acide conjugué $(CH_3)_3NH^+$ (aq), donc la molécule mal odorante et volatile disparaît. On obtient à la place un ion soluble dans l'eau et non volatile, ce qui permet d'atténuer ou de faire disparaître les mauvaises odeurs.

4. Le jus de citron contient un acide, l'acide citrique, que l'on peut noter AH, qui joue le même rôle que l'acide éthanoïque :

$$AH\,(aq) + (CH_3)_3N\,(aq) \rightarrow A^-\,(aq) + (CH_3)_3NH^+\,(aq)$$

EXERCICE SIMILAIRE

30 Diminuer l'acidité d'un plat

Pour diminuer l'acidité d'un plat, due à la présence d'un acide que l'on notera AH, on conseille parfois d'ajouter lors de la cuisson, un peu d'hydrogénocarbonate de sodium $NaHCO_3$ (s) appelé aussi bicarbonate de soude.

Données :

• Couples de l'ion hydrogénocarbonate : CO_2 (aq), H_2O (ℓ) / HCO_3^- (aq) et HCO_3^- (aq) / CO_3^{2-} (aq).

1. Écrire l'équation de dissolution dans l'eau de l'hydrogénocarbonate de sodium $NaHCO_3$ (s).

2. Expliquer le rôle de l'hydrogénocarbonate de sodium $NaHCO_3$ (s).



S'entraîner pour maîtriser

SAVOIR RÉDIGER

31 Proposer une correction de la solution donnée par un élève à l'énoncé.

Énoncé

Les comprimés effervescents de vitamine C contiennent de l'acide ascorbique $C_6H_8O_6$ (s) et de l'hydrogénocarbonate de sodium $NaHCO_3$ (s).
Lors de la mise en solution aqueuse d'un comprimé, une réaction chimique acide-base se produit et on observe un dégagement gazeux.

1. Quelle est la formule de l'ion ascorbate, la base conjuguée de l'acide ascorbique $C_6H_8O_6$ (aq) ?
Écrire le couple acide-base correspondant.

2. Écrire l'équation de dissolution dans l'eau de l'hydrogénocarbonate de sodium $NaHCO_3$ (s).

3. À quels couples acide-base l'ion hydrogénocarbonate HCO_3^- (aq) appartient-il ?

4. Quels sont les couples acide-base mis en jeu lors de la réaction chimique considérée ?

5. Écrire l'équation de la réaction supposée totale et identifier la nature du gaz produit.

Solution proposée par un élève

1. La formule de l'ion ascorbate est $C_6H_7O_6^-$ (aq). Le couple acide-base s'écrit : $C_6H_8O_6$ (aq) / $C_6H_7O_6^-$ (aq).
2. $NaHCO_3$ (s) + H_2O → Na^+ (aq) + HCO_3^- (aq)) L'eau ne doit pas figurer dans l'équation de dissolution.
3. L'ion HCO_3^- appartient aux couples acide-base : CO_2, H_2O / HCO_3^- et HCO_3^- / CO_3^{2-}.) Compléter avec l'état des espèces chimiques : (aq), (ℓ), (g) ou (s).
4. Les deux réactifs de la réaction sont l'acide ascorbique $C_6H_8O_6$ (aq) et l'ion HCO_3^- (aq).
Les couples acide-base mis en jeu sont : $C_6H_8O_6$ / $C_6H_7O_6^-$ et HCO_3^- / CO_3^{2-}.) Deux acides ne peuvent pas réagir ensemble.
5. $C_6H_8O_6$ + HCO_3^- → $C_6H_7O_6^-$ + CO_3^{2-}.) Il faut considérer l'autre couple de l'ion HCO_3^- pour obtenir un gaz.

32 Chimie et mauvaises odeurs HISTOIRE DES SCIENCES

« Guyton de Morveau (1737-1816), avocat de Dijon, se passionnait pour la chimie. Il est l'auteur d'un Traité des moyens de désinfecter l'air.
En 1773, dit-il, l'hiver avait été si rigoureux que la terre était gelée à une grande profondeur, de sorte qu'on ne pouvait y creuser les tombes.
Les cadavres, recouverts de chaux, furent entreposés dans les caves de l'église Saint-Médard. L'odeur devint bientôt si insupportable qu'il fallut fermer l'église. On avait en vain essayé des fumigations de vinaigre et allumé des brasiers sur lesquels on jetait différents parfums et des herbes odorantes.
On sait aujourd'hui que l'odeur de cadavre est due à différentes amines volatiles, issues du catabolisme des protéines, prosaïquement dénommées cadavérine, putrescine, etc.
Ayant remarqué que les vapeurs de chlorure d'hydrogène (HCl) et d'ammoniac (NH_3) se combinent en chlorure d'ammonium, solide ionique inodore, Guyton en fit l'essai en grand le 6 mars.
Du sel commun fut ajouté à de l'acide sulfurique concentré dans une grande cloche de verre renversée. La cloche fut placée sur un bain de cendres froides progressivement chauffées par un grand réchaud. Le chlorure d'hydrogène qui s'en dégageait se combinait avec les amines nauséabondes volatiles en composés solides. Le lendemain, après avoir aéré pour renouveler l'air, toute mauvaise odeur avait disparu. Quatre jours après, l'église fut rendue au culte, selon lui, « sans danger et même sans inquiétude ».
Le procédé fut appliqué pour désinfecter l'air des hôpitaux militaires sous la Convention, le Directoire et le Premier Empire. »

Extrait du site **https://www.mediachimie.org**

1. Rechercher ce que signifie « l'odeur de cadavre est due à différentes amines volatiles, issues du catabolisme des protéines ».

2. a. Écrire l'équation de la réaction acide-base entre « les vapeurs de chlorure d'hydrogène (HCl) et d'ammoniac (NH_3) ».
b. Quels sont les couples acide-base mis en jeu ?

3. Pour simplifier, on note R—NH_2 la formule des amines nauséabondes (cadavérine, putrescine, etc.).
a. Écrire l'équation de la réaction acide-base entre le chlorure d'hydrogène et les amines, réaction supposée totale.
b. Quels sont les couples acide-base mis en jeu ?
c. Expliquer la disparition des mauvaises odeurs.

33 Le pH de l'eau distillée

De l'eau fraîchement distillée est laissée quelque temps à l'air libre dans un bécher, à 25 °C. En mesurant son pH, on constate qu'il diminue progressivement, puis se stabilise à la valeur de 5,7. La dissolution lente et progressive dans l'eau distillée du dioxyde de carbone présent dans l'air permet d'expliquer cette diminution de pH.

Donnée : *couple acide-base CO_2 (g), H_2O(ℓ) / HCO_3^- (aq).*

1. Quel devrait être théoriquement le pH de cette eau distillée ?

2. Pourquoi la dissolution du dioxyde de carbone permet-elle d'expliquer cette diminution de pH ? Justifier la réponse.

Coup de pouce

▸ Écrire l'équation de la réaction acide-base entre deux couples acide-base.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

34 Methyl orange

An acid-base pH indicator is an acid-base pair in which the two associated types do not have the same colour. Methyl orange is a pH indicator which displays a red colour in its acidic form, HIn (aq), and a yellow colour in its basic form, In^- (aq).



basic form acid form

1. Methyl orange in acid form is poured into a beaker containing a solution of sodium hydroxide (Na^+ (aq), HO^- (aq)).
a. Identify the acid-base pairs involved, then write the equation for the acid-base reaction that takes place in the beaker.
b. What happens to the colour of the solution? Justify your answer.

2. A solution of hydrochloric acid (H_3O^+ (aq), Cl^- (aq)) is then poured into the previous beaker.
a. What happens to the colour of the solution?
b. Write the acid-base reaction equation that explains this colour change.

35 La verdunisation

D'après Olympiades de chimie

L'eau de Javel, préparée depuis plus de deux siècles, reste l'un des produits désinfectants les plus efficaces contre les contaminations bactériennes et virales.

En milieu basique, cette eau est une solution aqueuse d'hypochlorite de sodium (Na^+ (aq), ClO^- (aq)) et de chlorure de sodium (Na^+ (aq), Cl^- (aq)).

L'ion hypochlorite ClO^- (aq) est un désinfectant, il possède cependant un pouvoir bactéricide assez faible, contrairement à l'acide hypochloreux HClO (aq).

Dans le cas des désinfections d'eaux suspectes, le traitement anti-microbien peut utiliser l'eau de Javel, selon deux procédés :
- la **javellisation**, où la quantité d'eau de Javel à ajouter est fonction de la contamination, ou, grossièrement, du taux de matières organiques ;
- la **verdunisation**, qui préconise des doses d'eau de Javel de dix à cinquante fois plus faibles avec une efficacité démontrée.

La différence se situe au niveau du protocole. Dans le procédé de verdunisation, l'addition d'eau de Javel est réalisée lentement avec un brassage vigoureux et prolongé. Ces conditions favorisent la dissolution du dioxyde de carbone, ce qui abaisse le pH et libère l'acide hypochloreux HClO qui est plus efficace. Le terme *verdunisation* provient de la Première Guerre mondiale. Cette technique a été utilisée à cette époque, à grande échelle, pour désinfecter l'eau de la Meuse, consommée par les poilus de Verdun.



Verdun, 1916. Les corps des soldats morts sur le champ de bataille contribuent à polluer les eaux. Un système de désinfection peu coûteux doit être rapidement trouvé.

Données :
• Couples acide-base : CO_2 (g), H_2O (ℓ) / HCO_3^- (aq) ; HClO (aq) / ClO^- (aq) ; H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ).

DÉMARCHE EXPERTE

1. Pourquoi la dissolution du dioxyde de carbone abaisse-t-elle le pH d'une solution aqueuse ?

2. Pourquoi cette dissolution rend-elle la désinfection plus efficace ?

DÉMARCHE AVANCÉE

1. a. Écrire l'équation de la réaction acide-base entre le dioxyde de carbone dissout dans l'eau et l'eau.
b. En déduire pourquoi la dissolution du dioxyde de carbone abaisse le pH d'une solution aqueuse.

2. a. Écrire l'équation de la réaction acide-base entre le dioxyde de carbone dissout et l'ion hypochlorite ClO^- (aq) présent dans l'eau de Javel.
b. En déduire pourquoi cette dissolution rend la désinfection plus efficace

36 Les calculs urinaires

Les calculs urinaires sont des concrétions minérales qui se forment dans les voies urinaires.

La formation des calculs découle des prédispositions génétiques, mais surtout de l'alimentation et d'un manque d'hydratation.



Ainsi, un pH acide favorise la formation de cristaux d'acide urique, un solide ionique de formule $C_5H_4N_4O_3$ (s). Ces cristaux peuvent être dissouts dans les voies urinaires en buvant chaque jour 1 à 2 L d'eau de type « eau de Vichy ».

SOURCE ROYALE COMPOSITION MOYENNE EN MG/L			
Bicarbonates*	4368	Sodium	1708
Chlorures	322	Potassium	110
Sulfates	174	Calcium	90
Fluorures	<1,5	Magnésium	11
Minéralisation totale			
Extrait sec à 180°C : 4774mg/l - pH : 6,6			

** ion bicarbonate HCO_3^- (aq) appelé aussi ion hydrogénocarbonate*

Le rôle du pH urinaire est essentiel dans la formation des calculs d'acide urique. En effet, si le pH de l'urine est voisin de 5, alors tout l'acide urique est présent à l'état non ionisé insoluble, sous la forme $C_5H_4N_4O_3$ (s).

En revanche, si le pH de l'urine est voisin de 7, alors 95 % de l'acide urique sont sous la forme de sa base conjuguée, l'ion urate, soluble en solution aqueuse. Ainsi, tout facteur favorisant l'acidité des urines va faciliter la formation de calculs d'acide urique.

Données :

- *Masses molaires atomiques :*
$M_H = 1{,}0\ g \cdot mol^{-1}$; $M_C = 12{,}0\ g \cdot mol^{-1}$; $M_N = 14{,}0\ g \cdot mol^{-1}$; $M_O = 16{,}0\ g \cdot mol^{-1}$.
- *Incertitudes-types :* $u_{V_A} = 0{,}1\ mL$; $u_{c_A} = 0{,}02 \times 10^{-2}\ mol \cdot L^{-1}$.

— PARTIE 1

1. Écrire la demi-équation acide-base associée au couple acide urique / ion urate en solution aqueuse.

2. a. D'après l'étiquette fournie, quelle est l'espèce ionique majoritaire dans l'eau de Vichy ?

b. À quels couples acide-base cette espèce ionique appartient-elle ?

3. a. En déduire, comment la consommation d'eau de Vichy peut aider à la dissolution d'un calcul d'acide urique.

b. Écrire l'équation de la réaction acide-base expliquant ce phénomène.

JE VÉRIFIE QUE J'AI...

- identifié les réactifs de la réaction ;
- bien choisi les deux couples acide-base mis en jeu.

— PARTIE 2

Un homme de 55 ans ressent depuis quelques temps des douleurs dorsales. Son médecin lui prescrit une analyse d'urine afin de déterminer son taux d'acide urique. Pour cela, le patient doit collecter la totalité de ses urines pendant 24 heures, puis les remettre à un laboratoire d'analyses médicales. L'uricémie, ou taux d'acide urique, est normale si la masse d'acide urique dans les urines de 24 heures est comprise entre 250 mg et 750 mg. Le pH des urines de ce patient vaut 6,8 et le volume total des urines est de 1,50 L.

4. Déterminer l'espèce du couple acide urique / ion urate, qui est prédominante dans les urines.

Le laborantin prélève un échantillon d'urine de volume $V = 50{,}0$ mL. Pour déterminer le taux d'acide urique, il faut transformer toute la quantité de matière de l'espèce prédominante présente dans l'urine en son espèce conjuguée. Pour cela, il doit verser un volume minimum $V_A = 10{,}2$ mL d'acide chlorhydrique (H_3O^+ (aq), Cl^- (aq)) de concentration $c_A = 2{,}00 \times 10^{-2}\ mol \cdot L^{-1}$.

5. a. Identifier les couples acide-base mis en jeu lors de la réaction.

b. Déterminer les demi-équations acide-base et l'équation modélisant cette transformation supposée totale.

c. Établir un tableau d'avancement pour déterminer l'avancement final.

d. En déduire la quantité de matière d'espèce prédominante, contenue dans la totalité des urines du patient.

e. Sachant que cette quantité de matière est la même que celle de l'acide urique, déterminer la masse d'acide urique $m_{\text{acide urique}}$ contenue dans les urines du patient.

f. Déterminer l'incertitude-type relative $\frac{u_{m_{\text{acide urique}}}}{m_{\text{acide urique}}}$ dont on admet que, dans les conditions de l'expérience, la valeur est donnée par cette relation :

$$\left(\frac{u_{m_{\text{acide urique}}}}{m_{\text{acide urique}}}\right)^2 = \left(\frac{u_{V_A}}{V_A}\right)^2 + \left(\frac{u_{c_A}}{c_A}\right)^2$$

En déduire l'incertitude-type $u_{m_{\text{acide urique}}}$.

g. L'uricémie du patient est-elle normale ? Justifier la réponse.

h. Que risque le patient si son alimentation favorise une diminution du pH de ses urines ? Justifier la réponse.

À L'ORAL

37 Correction du pH de l'eau d'une piscine

Préparer un exposé oral permettant d'expliquer la baisse de la valeur du pH de l'eau d'une piscine lorsqu'elle est très fréquentée, et le rôle des produits d'entretien.



Les mots-clés à utiliser

- Dissolution
- Couples acide-base mis en jeu
- Réactions acide-base
- Formation et/ou disparition d'ions H_3O^+ (aq)
- Concentration en ions H_3O^+ (aq)
- Évolution du pH

Différents facteurs déterminent l'évolution du pH d'une eau de baignade, par exemple, une fréquentation importante de la piscine fait baisser le pH de l'eau. En effet, lorsque l'eau est agitée, elle est en contact avec une plus grande quantité d'air, ce qui favorise la dissolution du dioxyde de carbone, entraînant ainsi la diminution du pH. La valeur du pH des piscines doit être comprise entre 7,2 et 7,4. Il est indispensable de contrôler régulièrement le pH, pour cela, deux produits d'entretien sont utilisés :
– le produit « pH-moins » contenant de l'hydrogénosulfate de sodium, un solide ionique de formule $NaHSO_4$ (s) ;
– le produit « pH-plus » contenant du carbonate de sodium, un solide ionique de formule Na_2CO_3 (s).

Données : CO_2 (g), H_2O (ℓ) / HCO_3^- (aq) ; HSO_4^- (aq) / SO_4^{2-} (aq) ; HCO_3^- (aq) / CO_3^{2-} (aq).

Ce court exposé devra pouvoir se réaliser sans note écrite.

Coup de pouce

- Penser à exploiter les équations de dissolution dans l'eau des solides ioniques et les équations des réactions acide-base qui se produisent.

38 RETOUR SUR LA PAGE D'OUVERTURE

Lorsque l'on place une rondelle de citron dans une eau minérale riche en ions hydrogénocarbonate HCO_3^- (aq), des bulles se forment.

Donnée : *le citron contient de l'acide citrique* $C_6H_8O_7$ (aq).

Préparer un exposé oral expliquant la formation de ces bulles.



PRÉPA BAC

Développer ses compétences

39 Le Gouffre de Padirac et la Grande Pendeloque

RÉSOLUTION DE PROBLÈME — 60 min

AN/RAI Proposer une stratégie de résolution



Le Gouffre de Padirac, situé dans le département du Lot, est considéré comme l'une des plus grandes curiosités géologiques de France. Cette cavité, que l'on suppose cylindrique, de diamètre d'ouverture 35 m et de profondeur 103 m, permet d'atteindre une galerie souterraine où il règne une température proche de 13 °C.
Une rivière souterraine parcourt une grande partie du réseau qui se développe sur plus de 40 km.

Après une descente vertigineuse, la première partie de la visite qui s'effectue en barque, fait découvrir la « Grande Pendeloque », une stalactite géante de 60 m de longueur, suspendue au-dessus du « Lac de pluie ».

DOC 1 L'eau de pluie

L'air contient du dioxyde de carbone CO_2 (g).
L'eau de pluie, par contact avec l'air et lors de son passage dans la végétation, se charge en dioxyde de carbone.
Le dioxyde de carbone dissout dans l'eau s'écrit :

CO_2 (g), H_2O (ℓ)

DOC 2 Carbonate et hydrogénocarbonate de calcium

Le carbonate de calcium (ou calcite), est un solide ionique de formule $CaCO_3$ (s) qui est insoluble dans l'eau. Il est constitué d'ions calcium Ca^{2+} et d'ions carbonate CO_3^{2-}.
L'hydrogénocarbonate de calcium est un solide ionique de formule $Ca(HCO_3)_2$ (s) qui est soluble dans l'eau. Il est constitué d'ions calcium Ca^{2+} et d'ions hydrogénocarbonate HCO_3^-.

Données :
- *Masse volumique moyenne du carbonate de calcium $CaCO_3$ (s) : $\rho = 2{,}7 \times 10^3\ kg \cdot m^{-3}$.*
- *Solubilité du carbonate de calcium dans l'eau : $3\ mmol \cdot L^{-1}$.*
- *Les couples acide-base de l'ion hydrogénocarbonate : CO_2 (g), H_2O (ℓ) / HCO_3^- (aq) ; HCO_3^- (aq) / CO_3^{2-} (aq).*
- *Masse molaire du carbonate de calcium : $M(CaCO_3) = 100{,}1\ g \cdot mol^{-1}$.*

DOC 3 Formation d'une stalactite



Lorsqu'une eau de pluie ayant infiltré une roche calcaire arrive au plafond d'une grotte, elle peut donner lieu à un suintement se répétant indéfiniment.
Si le phénomène est très lent, l'eau de la grotte suintant du plafond s'évapore progressivement en même temps que le dioxyde de carbone se dégage dans l'atmosphère de la grotte. Il se forme alors une stalactite au plafond.

La Grande Pendeloque et le lac de pluie.

DOC 4 Données météorologiques à Gourdon*

1 mm de précipitations équivaut à 1 L d'eau de pluie par mètre carré au sol.

** Lieu proche du Gouffre de Padirac*



Source : site de Météo France.

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. On émet l'hypothèse que la cavité du gouffre s'est formée par disparition du carbonate de calcium (calcite) présent dans les roches calcaires par réaction avec l'eau de pluie s'infiltrant dans le sol. Expliquer la formation de ce gouffre à l'aide d'une réaction acide-base dont on donnera l'équation.

2. a. D'après la question 1, le calcaire et le dioxyde de carbone se sont transformés en deux espèces chimiques dissoutes dans les eaux de ruissellement. Quelles sont ces espèces ?
b. Une de ces espèces est amphotère. Laquelle ? Expliquer pourquoi cette espèce est capable de réagir avec elle-même.
Écrire l'équation de cette réaction acide-base.
c. En déduire comment se forme une stalactite.

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

On admet qu'environ 70 % des précipitations (pluie, neige, etc.) s'infiltrent dans la roche autour de Padirac.

Estimer le nombre d'années nécessaires à la formation d'une cavité de dimensions proches de celles du Gouffre.

Donnée : *le volume d'un cylindre de rayon R et de hauteur h est $V = \pi R^2 \cdot h$.*

Il est attendu une prise d'initiatives et une présentation de la démarche suivie même s'il elle n'a pas abouti, et de justifier toute réponse.

40 Éliminer le tartre

RÉSOLUTION DE PROBLÈME

60 min

AN/RAI Proposer une stratégie de résolution

Dans nos maisons, les dépôts de tartre sont nombreux. Ils se forment sur les robinets, les lavabos, les lave-linges... Ces dépôts de tartre sont constitués de carbonate de calcium, un solide ionique de formule $CaCO_3$ (s) quasiment insoluble dans l'eau. Ils peuvent être dissouts en utilisant des solutions acides telles que les solutions de détartrants du commerce.



DOC 1 Un détartrant commercial

L'étiquette d'un détartrant commercial indique :

acide chlorhydrique à 9 %

ce qui correspond à 9,0 g de HCl (g) dissout dans de l'eau pour obtenir 100 g de solution détartrante.

Le HCl (g) réagit totalement avec l'eau pour former de l'acide chlorhydrique (H_3O^+ (aq), Cl^- (aq)).

Données :

- *Masse volumique de la solution commerciale de détartrant : $\rho_d = 1{,}04 \times 10^3\ g \cdot L^{-1}$.*
- *Masse molaire de l'acide chlorhydrique : $M(HCl) = 36{,}5\ g \cdot mol^{-1}$.*

DOC 2 Concentration de la solution commerciale de détartrant

Pour déterminer la concentration en quantité de matière d'acide chlorhydrique de la solution commerciale de détartrant, on suit le protocole suivant.

- On dilue 20 fois la solution commerciale pour obtenir une solution S.
- On verse un volume $V_S = 10{,}0$ mL de solution S dans un erlenmeyer.
- On mesure, à l'aide d'un pH-mètre, le pH de la solution obtenue.

La valeur trouvée est proche de 1.

- On verse ensuite lentement une solution d'hydroxyde de sodium (Na^+ (aq), HO^- (aq)) afin d'avoir une solution neutre, de pH = 7.

Données :

- *Couples acide-base : H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ) ; H_2O (ℓ) / HO^- (aq).*

DOC 3 Un tambour entartré



Tambour de lave-linge après détartrage.

Pour détartrer la surface extérieure du tambour cylindrique fermé d'un lave-linge, recouvert d'une épaisseur e de calcaire de 10 µm environ, on dispose d'un flacon contenant 750 mL du détartrant commercial.

Étant donnée la faible épaisseur de la couche de tartre, son volume est approximativement égal au produit de la surface extérieure du tambour par l'épaisseur de la couche de tartre. L'acide chlorhydrique (H_3O^+ (aq), Cl^- (aq)) agit sur le tartre selon la réaction dont l'équation est :

$$2\ H_3O^+\ (aq) + CaCO_3\ (s) \rightarrow Ca^{2+}\ (aq) + CO_2\ (g) + 3\ H_2O\ (\ell)$$

Données :

- *Masse volumique du carbonate de calcium : $\rho = 2{,}65 \times 10^6\ g \cdot m^{-3}$.*
- *Masse molaire du calcaire : $M(CaCO_3) = 100{,}1\ g \cdot mol^{-1}$.*
- *Aire $\mathcal{A}$ de la surface extérieure totale d'un cylindre fermé de rayon R et de hauteur h :*

$$\mathcal{A} = 2\pi R^2 + 2\pi R \cdot h$$

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. En utilisant les informations de l'étiquette, calculer la concentration en quantité de matière d'acide chlorhydrique dans la solution commerciale et montrer qu'elle est de l'ordre de 2,6 mol · L^{-1}.

2. a. Identifier les couples acide-base mis en jeu (doc. 2) et écrire l'équation de la réaction acide-base supposée totale.

b. Le protocole (doc. 2) permet de déterminer $n(H_3O^+\ (aq))$, la quantité de matière d'ions H_3O^+ (aq) présente dans le volume V_S :

$$n(H_3O^+\ (aq)) = 1{,}2 \times 10^{-3}\ mol$$

En déduire la concentration c en quantité de matière d'ions H_3O^+ (aq) dans la solution commerciale.

Ce résultat est-il compatible avec la valeur trouvée en 1 ?
Calculer l'écart relatif et conclure.

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

La contenance du flacon de détartrant commercial utilisé est-elle suffisante pour détartrer totalement le tambour du lave-linge ?

Il est attendu une prise d'initiatives et une présentation de la démarche suivie même s'il elle n'a pas abouti, et de justifier toute réponse.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique.

41 Une « lampe à lave » éphémère

ANALYSE ET SYNTHÈSE DES DOCUMENTS

30 min

APP Rechercher et organiser l'information

De nombreux sites internet expliquent comment réaliser, de façon artisanale, une « lampe à lave » éphémère. L'objectif de cet exercice est d'étudier le principe du fonctionnement d'une telle « lampe ».

DOC 1 Fabrication d'une « lampe à lave » éphémère



Cette expérience est très simple à réaliser.

- On dépose du bicarbonate de soude au fond d'un récipient transparent.
- On ajoute délicatement de l'huile végétale claire.
- On verse ensuite délicatement des gouttelettes de vinaigre mélangé à du colorant alimentaire.

Le vinaigre pénètre dans l'huile en formant des gouttelettes qui descendent au fond du récipient. Puis, à peine touchent-elles le fond qu'elles remontent jusqu'à la surface, avant de redescendre à nouveau, et ainsi de suite...

DOC 2 Données sur les ingrédients utilisés

- Le **bicarbonate de soude** du commerce est en réalité de l'hydrogénocarbonate de sodium $NaHCO_3$ (s). Il est soluble dans l'eau et insoluble dans l'huile.
- Le **vinaigre** est une solution aqueuse d'acide acétique CH_3CO_2H (aq).
- Densités du vinaigre et de l'**huile** : $d_v = 1,0$; $d_h = 0,92$.
- Masses molaires : $M(CH_3CO_2H) = 60,0\ g \cdot mol^{-1}$; $M(NaHCO_3) = 84,0\ g \cdot mol^{-1}$.
- Couples acide-base : CH_3CO_2H (aq) / $CH_3CO_2^-$ (aq) ; CO_2 (g), H_2O (ℓ) / HCO_3^- (aq).
- Masse de bicarbonate de sodium introduite : $m = 5,0$ g.
- Nombre de gouttelettes de vinaigre introduites : $N = 120$.
- La quantité de matière d'acide acétique à l'état initial, contenue dans une gouttelette de vinaigre, est :

$$n = 3,7 \times 10^{-5}\ mol$$

- Le volume molaire dans les conditions de l'expérience est : $V_m = 24,1\ L \cdot mol^{-1}$

DOC 3 Principe de fonctionnement

Lorsque les gouttelettes de vinaigre entrent en contact avec le bicarbonate de soude, cela provoque une réaction chimique qui conduit à la formation d'un gaz. Rapidement, ce gaz ainsi créé forme des bulles qui s'accrochent sur les gouttelettes de vinaigre. Le volume de ces bulles augmente progressivement, et les gouttelettes remontent à la surface. Une fois arrivées à la surface, les bulles de gaz éclatent. Débarrassées des bulles de gaz, les gouttelettes de vinaigre redescendent dans l'huile. Et le mouvement de va-et-vient recommence...

ANALYSE

1. Écrire l'équation de la réaction chimique correspondant à la transformation qui a lieu lorsque la gouttelette de vinaigre touche le bicarbonate de soude solide se trouvant au fond du récipient. Cette transformation est considérée comme totale. Quel est le nom du gaz formé ?

2. Où les bulles de gaz se forment-elles ? Expliquer le mouvement descendant et ascendant des gouttelettes de vinaigre.

3. Calculer le volume de gaz dégagé.

SYNTHÈSE

Pourquoi dit-on que la « lampe à lave » est éphémère ?

VERS LE SUP'

42 Formule brute d'une amine

Pour déterminer la masse molaire d'une amine non cyclique, de formule générale R—NH_2 (R est un groupe alkyle), on dissout 0,59 g de cette amine dans de l'eau. Puis, on ajoute de l'acide chlorhydrique (H_3O^+ (aq), Cl^- (aq)) de concentration en quantité de matière $c_A = 0,50\ mol \cdot L^{-1}$, afin de transformer la totalité de la quantité de matière de cette amine en son espèce conjuguée. Le volume minimum nécessaire d'acide chlorhydrique pour réaliser cette transformation est $V_A = 20,0$ mL.

Données :

• Masses molaires atomiques : $M_H = 1,0\ g \cdot mol^{-1}$; $M_C = 12,0\ g \cdot mol^{-1}$; $M_N = 14,0\ g \cdot mol^{-1}$.

1. Identifier les couples acide-base mis en jeu, puis écrire l'équation de la réaction chimique, supposée totale, qui se produit lorsque l'on mélange la solution aqueuse d'amine et l'acide chlorhydrique.

2. Établir un tableau d'avancement pour déterminer l'avancement final x_{final}.

3. Montrer que la masse molaire (en $g \cdot mol^{-1}$) de l'amine considérée peut s'écrire : $M = 14n + 17$ où n est le nombre d'atomes de carbone.

4. En déduire la formule brute de l'amine.

5. Donner toutes les formules semi-développées possibles des amines isomères.

6. Établir les représentations de Lewis de tous les couples acide-base possibles.

La vanilline



Contexte

Le but de cette épreuve est de vérifier qu'un flacon d'extrait de vanille du commerce respecte bien la teneur minimale en vanilline pour porter l'indication « arôme de vanille ».

Documents mis à disposition

DOC 1 **Arôme de vanille**

Dans un flacon portant l'indication « arôme de vanille », la teneur minimale en vanilline doit être de 0,2 % en masse, c'est-à-dire qu'il doit contenir 2 g de vanilline pour 1 kg de produit.

DOC 2 **Données sur la vanilline**

• La **vanilline** est une molécule qui possède un caractère acide, on la note **AH**.

Sa base conjuguée est l'**ion vanillinate**, noté A^-.

Si le pH d'une solution est inférieur à 7,40, c'est la forme acide qui prédomine, alors on a : $[AH] > [A^-]$.

Si le pH de la solution est supérieur à 7,40, c'est la forme basique qui prédomine, alors on a : $[AH] < [A^-]$.

• Une solution d'ions vanillinate n'est pas colorée, mais il est possible d'identifier ses ions A^- par spectroscopie UV-visible dans la mesure où ces ions absorbent pour une longueur d'onde $\lambda_{max} = 340$ nm.

Dans ce cas, l'**absorbance** A des solutions contenant des ions vanillinate A^-, dissouts dans une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium à 0,1 mol · L^{-1}, est donnée par la relation : $A = 2{,}75 \times 10^4 \cdot c$

c étant la concentration (en mol · L^{-1}) en quantité de matière d'ions vanillinate.

Matériel mis à disposition

- Une fiole jaugée de 50,0 mL contenant la solution aqueuse S_v d'ions vanillinate.
- Une fiole jaugée de 50,0 mL contenant la solution aqueuse S_d d'ions vanillinate
- Un spectrophotomètre avec des cuves
- Un pH-mètre étalonné
- Des béchers

Travail à effectuer

1. (ANAL) (RÉA) **Proposition et mise en œuvre de protocole expérimental** *(15 min conseillées)*

Afin de vérifier que l'extrait de vanille commercial à disposition respecte la teneur minimale en vanilline, il est possible de la doser par spectrophotométrie, sous sa forme basique.

La vanilline, contenue dans 1,0 mL d'extrait commercial de vanille, est extraite, puis transférée dans une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium afin de transformer la vanilline en ions vanillinate. On obtient 250 mL d'une solution aqueuse d'ions vanillinate, appelée solution S_v.

■ À partir des documents et du matériel disponible, proposer, puis mettre en œuvre un protocole expérimental permettant de justifier que la vanilline est sous forme d'ions vanillinate dans cette solution.

Être en mesure de présenter et de réaliser le protocole

2. (ANAL) (RÉA) **Proposition et mise en œuvre de protocole expérimental** *(25 min conseillées)*

La solution aqueuse obtenue S_v étant encore trop concentrée pour une analyse spectrophotométrique, elle doit être diluée 10 fois dans une solution d'hydroxyde de sodium à 0,1 mol · L^{-1}. La solution diluée est appelée solution S_d.

1. À partir des documents et du matériel disponible, proposer une méthode utilisant la spectrophotométrie pour déterminer c_d, la concentration en quantité de matière d'ions vanillinate de la solution S_d. Préciser la longueur d'onde de travail la plus adaptée.

2. Mettre en œuvre la méthode proposée et déterminer c_d. En déduire la concentration c_v de la solution S_v.

Être en mesure de présenter et de réaliser le protocole proposé

3. (VAL) **Exploitation du résultat obtenu** *(20 min conseillées)*

On montre que le pourcentage massique (noté $\%m$) en vanilline de la solution commerciale est relié à c_v, la concentration en quantité de matière d'ions vanillinate (voir ci-contre).

$$\%m = \frac{100 \times 0{,}250 \times 152 \times c_v}{1{,}10}$$

1. Calculer la valeur du pourcentage massique en vanilline de la solution commerciale.

2. Commenter la valeur obtenue.

Défaire le montage et ranger la paillasse.

PISTE POUR LE GRAND ORAL PRÉPA BAC

UNE QUESTION

La prise d'aspirine est-elle sans danger ?

Enjeu de la question

L'acide acétylsalicylique, plus connu sous le nom d'aspirine, est le médicament le plus vendu dans le monde. Cependant, la prise d'aspirine n'est pas sans danger ! Pour limiter les risques, ce médicament se présente sous différentes formulations.

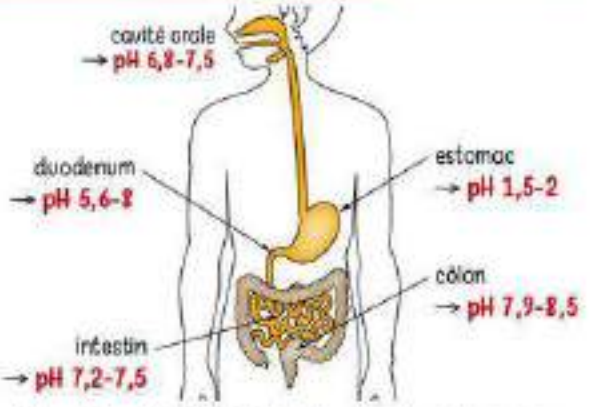
Proposition de plan de présentation

1. Qu'est-ce que l'aspirine ?
   - La molécule et son couple acide-base associé
   - Ses deux formes en fonction du pH
2. Les effets indésirables de la molécule d'aspirine
3. Trois formulations de l'aspirine (avantages et inconvénients)
   - L'aspirine simple
   - L'aspirine effervescente
   - L'aspirine sous forme de comprimé gastro-résistant

Les mots-clés

acide et base conjuguée › effervescence › hydrosoluble › liposoluble › action rapide › action lente › pH

Exemple de support de présentation



Absorption et distribution de l'aspirine dans l'organisme

L'acide acétylsalicylique est liposoluble, son absorption se fait au niveau de la muqueuse de l'estomac dont les tissus contiennent des lipides.
Il peut être aussi absorbé au niveau de la paroi intestinale sous la forme de sa base conjuguée hydrosoluble.

QUESTIONS D'APPROFONDISSEMENT POSSIBLES

À propos de l'aspirine…

- **Comment montrer simplement que les excipients d'un comprimé d'aspirine gastro-résistant résistent à l'acidité de l'estomac, mais pas à la basicité de l'intestin ?**
- **Proposer une expérience permettant de simuler ce qui se passe dans notre estomac lorsque l'on absorbe une solution aqueuse contenant un comprimé d'aspirine effervescent.**
- **Comment fabrique-t-on industriellement l'aspirine aujourd'hui ?**
- **Comment prouver qu'un comprimé d'aspirine ne contient pas uniquement de l'aspirine ?**

UN EXEMPLE DE PROJET PROFESSIONNEL

La pharmacologie est la branche des sciences médicales qui étudie les propriétés chimiques des médicaments et leur classification.

Après le bac : *Bac + 6, diplôme d'état de docteur en pharmacie ou master pharmacologie…*
Autres métiers : *Ingénieur(e) chimiste, pharmacien(ne) dans l'industrie…*

Le (la) **chargé(e) de pharmacovigilance** étudie les effets sur l'Homme des médicaments fabriqués et commercialisés par les laboratoires pharmaceutiques. Il (elle) analyse les effets thérapeutiques des médicaments sur la maladie pour lesquels ils sont fabriqués, mais aussi les autres effets non recherchés qui peuvent être bénéfiques ou indésirables. Il (elle) collabore avec les médecins qui prescrivent les médicaments, les infirmiers, les pharmaciens et les patients.



Avant d'aborder le chapitre

EN AUTONOMIE

LES ACQUIS INDISPENSABLES

1re Enseignement de spécialité — Seconde

- En chimie organique, les familles de composés sont définies par la présence d'un **groupe caractéristique** d'atomes.

  Ce groupe caractéristique peut être identifié par **spectroscopie infrarouge**.

- L'**équation de dissolution** d'un solide ionique de formule A_aB_b (s) constitué de cation A^{b+} et d'anion B^{a-}, s'écrit :

$$A_aB_b\,(s) \rightarrow a\,A^{b+}\,(aq) + b\,B^{a-}\,(aq)$$

- Le **spectre UV-visible** d'une solution explique sa couleur.

- La **concentration c en quantité de matière** de soluté est :

$$c = \frac{n}{V}$$

(c : concentration en mol · L^{-1} ; n : quantité de matière de soluté dissout en mol ; V : volume en L de la solution)

- La **loi de Beer-Lambert** est utile pour un dosage par étalonnage.

$$A = k \cdot c$$

(A : absorbance sans unité ; k : coefficient de proportionnalité en L · mol^{-1} ; c : concentration en mol · L^{-1})

- La **loi d'Ohm** établit une relation de proportionnalité entre tension et intensité pour les conducteurs ohmiques.

$$U = R \cdot I$$

(U : tension aux bornes du conducteur ohmique en V ; I : intensité du courant traversant le conducteur ohmique en A ; R : résistance du conducteur ohmique en Ω)

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

Pour chaque situation, rédiger une réponse qui explique en quelques lignes le raisonnement.

SITUATION 1

L'éthanal est une espèce chimique volatile qui contribue à l'odeur des jonquilles.

Écrire la formule semi-développée de cette molécule.



SITUATION 2

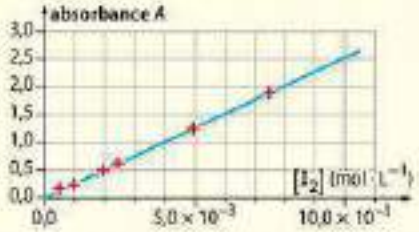
La principale source naturelle de fluor est le fluorure de calcium CaF_2 (s).

Quelle est l'équation de dissolution de ce solide ionique ?

Établir les relations entre la concentration en quantité de matière du soluté apporté c et les concentrations des ions présents en solution.

SITUATION 3

Cette courbe d'étalonnage du diiode I_2 a été tracée à l'aide d'un spectrophotomètre.



Quelle serait la concentration $[I_2]$ d'une solution d'absorbance A = 1,5 ?



CHAPITRE 2

CHIMIE

physiques d'analyse



Quelles méthodes issues des connaissances en physique permettent de mieux appréhender les systèmes chimiques ?

→ EXERCICE 33

NOTIONS ET CONTENUS

- Calcul et mesure du pH.
- Absorbance d'une solution.
- Conductance et conductivité.
- Identification de groupes caractéristiques par spectroscopie infrarouge.
- Identification d'espèces chimiques par spectroscopie UV-visible.

CAPACITÉS EXPÉRIMENTALES

- Tester la relation de calcul du pH. → Activité 1
- Réaliser une gamme étalon et déterminer la concentration d'un soluté par des mesures de conductance. → Activité 2

CAPACITÉ MATHÉMATIQUE

- Utiliser la fonction logarithme décimal et sa réciproque.

TP

COMPÉTENCES :
RÉA Mettre en œuvre les étapes d'une démarche
COM Présenter une démarche de manière argumentée

Calcul du pH d'une solution

L'acidité d'une solution dépend de sa concentration en quantité de matière d'ions oxonium H_3O^+. Peut-on établir une relation mathématique entre ces différentes grandeurs ?

DOC 1 Du matériel utile



DOC 2 Le pH

Fiche MATHS p. 532

La valeur du **potentiel Hydrogène**, ou **pH**, d'une solution est un nombre compris entre 0 et 14. Il peut être mesuré avec un pH-mètre préalablement étalonné.

Le pH est directement relié à la concentration $[H_3O^+]$ en quantité de matière d'ions oxonium de la solution, cette relation mathématique s'écrit ainsi :

concentration en ions H_3O^+ (en mol · L^{-1})

pH de la solution (sans unité) → $\mathrm{pH} = -\log\left(\frac{[H_3O^+]}{c^\circ}\right)$

concentration standard $c^\circ = 1$ mol · L^{-1}

Le logarithme décimal log est une **fonction mathématique**. La valeur du logarithme d'un nombre peut être calculée grâce à la touche log de la calculatrice.

DOC 3 Solutions diluées d'acide chlorhydrique

L'acide chlorhydrique (H_3O^+ (aq), Cl^- (aq)) est obtenu par dissolution d'un gaz, le chlorure d'hydrogène, dans l'eau :

$$HCl\,(g) + H_2O\,(\ell) \rightarrow H_3O^+\,(aq) + Cl^-\,(aq)$$

Une gamme de solutions de différentes concentrations peut être réalisée par dilutions successives d'une solution-mère.

GESTE EXPÉRIMENTAL

Une dilution est réalisée dans une fiole jaugée. De l'eau distillée est ajoutée à un volume de solution-mère, prélevé avec une pipette jaugée.



DÉMARCHE EXPERTE

Élaborer un protocole expérimental permettant de tester la relation entre le pH et la concentration en quantité de matière d'ions oxonium d'une solution.

DÉMARCHE AVANCÉE

1. Mesurer les pH d'une gamme de solutions obtenues par dilutions successives de la solution-mère (doc. 3) (FICHE PRATIQUE ➡ p. 379).

2. a. Tracer un graphique permettant de tester la relation mathématique donnée (doc. 2).
b. En déduire le domaine de validité de la relation donnant le pH.

DÉMARCHE ÉLÉMENTAIRE

1. a. Réaliser, par dilution d'un facteur 10 de la solution-mère, une solution d'acide chlorhydrique de concentration 10^{-2} mol · L^{-1} (voir geste expérimental).
b. Répéter cette opération pour obtenir une gamme de solutions jusqu'à 10^{-8} mol · L^{-1}.
c. Mesurer le pH de ces solutions.

2. Calculer l'opposé du logarithme des concentrations des solutions de la gamme obtenue (doc. 2).

3. a. Tracer le graphique représentant le pH des solutions en fonction de l'opposé du logarithme de leur concentration.
b. Repérer les valeurs de concentration pour lesquelles la relation du document 2 est vérifiée, puis en déduire le domaine de validité de cette relation.

Je réussis si...

- Je sais réaliser une gamme de solutions diluées à partir d'une solution-mère.
- Je sais utiliser un pH-mètre.
- Je sais exploiter un graphique pour tester une relation mathématique.
- DÉMARCHE EXPERTE Je décris le protocole expérimental avec du texte et des schémas.

2. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE

TP

COMPÉTENCES :
(APP) Rechercher et organiser l'information
(AN RAI) Élaborer un protocole

Dosage par conductimétrie

Comment surveiller la salinité des océans à partir d'une mesure de conductance ?

DOC 1 Salinité des océans



Les océanographes étudient les courants marins responsables du climat et notamment d'épisodes météorologiques violents tels que les ouragans.

Le moteur de ces courants est la différence de **densité** de l'eau suivant la profondeur et le lieu sur le globe terrestre.

La densité dépend essentiellement de la température et de la concentration en masse de sels marins. Cette concentration vaut en moyenne $27\ g \cdot L^{-1}$ pour le chlorure de sodium.

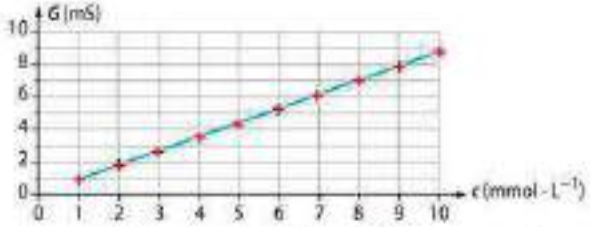
Une équipe de scientifiques réalise un prélèvement proche de la banquise au pôle Nord. Celui-ci est dilué 100 fois avant la mesure de sa conductance. La conductance de la solution diluée S_d est $G = 0{,}74$ mS.

VOCABULAIRE

- **Densité** (d'une solution) : quotient de sa masse volumique ρ par celle de l'eau ρ_{eau}, prise comme référence.

DOC 2 Loi de Kohlrausch*

Un conductimètre mesure la conductance G d'une solution ionique. Cette grandeur est proportionnelle à la concentration en quantité de matière de soluté apporté c.



La mesure de la conductance n'est **valide** que pour des solutions ioniques diluées de concentration $c < 10^{-2}$ mol · L^{-1}.

* *Friedrich Kohlrausch* (1840-1910), *physicien allemand.*

DOC 3 Dissolution du chlorure de sodium

Le chlorure de sodium est le principal responsable de la salinité des océans. C'est un composé ionique solide de formule brute NaCl et de masse molaire $M = 58{,}5\ g \cdot mol^{-1}$, plus communément appelé sel de table.

La dissolution dans l'eau de ce soluté s'écrit :

$$NaCl\,(s) \rightarrow Na^+\,(aq) + Cl^-\,(aq)$$

Pour une solution de concentration c en quantité de matière de soluté apporté, on a :

$$[Na^+\,(aq)] = c \text{ et } [Cl^-\,(aq)] = c$$

On dispose au laboratoire d'une solution-mère S_m de concentration en quantité de matière $c_m = 1{,}0 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.

EXPLOITATION ET ANALYSE

1 a. Réaliser une gamme étalon par dilution de la solution-mère S_m (FICHE PRATIQUE ➡ p. 379) en s'aidant du tableau ci-contre.

b. Recopier et compléter le tableau. La loi de Kohlrausch (doc. 2) est-elle valide pour ces concentrations ?

Solution-fille S_i	Volume (en mL)		Concentration c_i (en mol · L^{-1}) de la solution S_i
	S_m	S_i	
S_1	10	50	
S_2	20	50	
S_3	30	50	
S_4	40	50	

2 Élaborer un protocole expérimental permettant de déterminer la concentration en quantité de matière de la solution diluée S_d issue du prélèvement proche de la banquise.

3 Pourquoi les mesures de conductance n'ont-elles pas été effectuées directement sur le prélèvement ?

CONCLUSION

4 Comment la salinité du prélèvement se situe-t-elle par rapport à la moyenne des océans ?

Je réussis si...

- **Je sais choisir la verrerie appropriée pour effectuer une dilution.**
- **Je sais réaliser une courbe d'étalonnage, puis l'utiliser pour déterminer une concentration inconnue.**

TP

COMPÉTENCES :
APP Rechercher et organiser l'information
ANA RAI Proposer une stratégie de résolution

Spectroscopie infrarouge



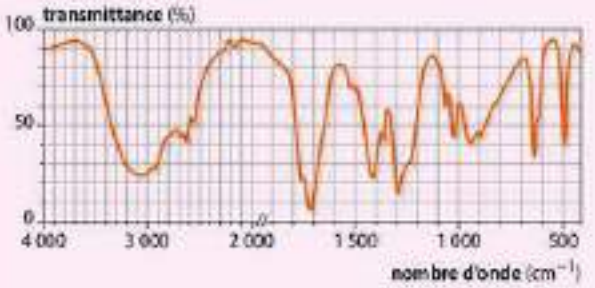
LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

On dispose de deux échantillons de vin*, prélevés dans deux bouteilles différentes.
Le bouchon de l'une des deux bouteilles est poreux, le vin semble altéré.
En effet, le vin se dégrade au contact de l'air. On réalise alors une analyse des deux échantillons par spectroscopie infrarouge (IR).

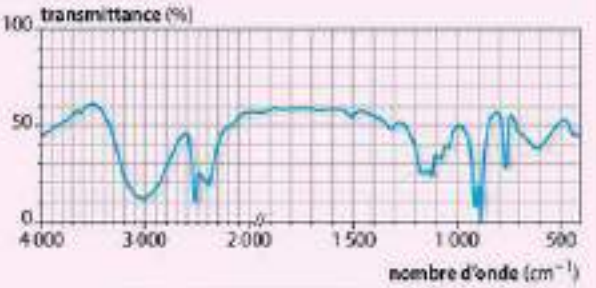
Cette méthode d'analyse permet-elle de conclure quant à la qualité du contenu des deux bouteilles ?

* **Attention :** l'abus d'alcool est dangereux pour la santé.

Spectre IR du composé majoritaire dans la bouteille 1



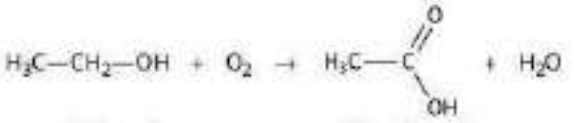
Spectre IR du composé majoritaire dans la bouteille 2



COUP DE POUCE ➡ p. 593

DOC 1 Du vin au vinaigre

Le vinaigre est utilisé comme condiment depuis les babyloniens, environ 4 000 ans avant notre ère. En 1865, Louis Pasteur décrit une espèce bactérienne, l'*Acetobacter*, responsable de la transformation de l'éthanol du vin en acide acétique (*acetum* signifie *vinaigre* en latin). Dans la nomenclature systématique, l'acide acétique est aujourd'hui nommé *acide éthanoïque*. En présence du dioxygène contenu dans l'air, cette transformation chimique peut être modélisée par la réaction d'équation :



éthanol — **acide éthanoïque**



DOC 2 Spectroscopie infrarouge

La spectroscopie infrarouge (IR), par analyse de la fréquence des ondes électromagnétiques absorbées par un échantillon, permet d'obtenir des informations sur la structure de la matière.

Un spectre IR représente la **transmittance** T en fonction du **nombre d'onde** $\bar{\nu}$. Les pics (ou bandes) observés correspondent aux longueurs d'onde absorbées et peuvent être associés, en utilisant des tables (doc. 3), à des groupes d'atomes caractéristiques.

DOC 3 Tables de données spectroscopiques

Famille	Liaison	Nombre d'onde (en cm^{-1})	Largeur / Intensité du pic d'absorption
Alcools	O—H	3 200 - 3 700	large / forte
Cétones	C=O	1 705 - 1 725	fine / forte
Aldéhydes	C—H C=O	2 650 - 2 830 1 680 - 1 740	moyenne / moyenne fine / forte
Acides carboxyliques	O—H C=O	2 500 - 3 200 1 740 - 1 800	large / moyenne fine / forte

VOCABULAIRE

- **Nombre d'onde :** inverse de la longueur d'onde λ ($\bar{\nu}$ est exprimé en cm^{-1} si λ est en cm).
- **Transmittance :** quotient de l'intensité de la radiation transmise par l'intensité de la radiation incidente (T est exprimée en %).

Je réussis si...

- Je connais les groupes caractéristiques en chimie organique.
- Je sais identifier un groupe caractéristique à l'aide d'un spectre IR.

1 pH d'une solution

Détermination par le calcul

L'acidité ou la basicité d'une solution dépendent des valeurs des concentrations en ions **oxonium** H_3O^+ (aq) et **hydroxyde** HO^- (aq).

Les solutions utilisées au laboratoire étant souvent diluées, on donne plutôt leur **potentiel Hydrogène** : le pH.

• Le pH se calcule directement à partir de la **concentration en quantité de matière d'ions oxonium**.

concentration en ions H_3O^+ (en mol · L^{-1})

pH de la solution (sans unité) → $\mathbf{pH = -\log\left(\dfrac{[H_3O^+]}{c^\circ}\right)}$ ← concentration standard $c^\circ = 1$ mol · L^{-1}

• Réciproquement, il est possible de calculer la concentration en ions oxonium connaissant le pH de la solution.

$$[H_3O^+] = c^\circ \times 10^{-pH}$$

UN PONT VERS LES MATHS

Fonctions mathématiques

• Le logarithme décimal, ou log, est une fonction définie pour tout réel strictement positif.

Il transforme un produit en somme :

$\log(a \times b) = \log a + \log b$

$\log 1 = 0$ et $\log 10 = 1$

• Le log est la fonction réciproque de la fonction 10^x.

Pour $a > 0$, si $x = \log a$ alors $a = 10^x$.

→ Fiche MATHS p. 532

EXEMPLE

• Le pH d'une solution de concentration en ions oxonium $[H_3O^+] = 0{,}010$ mol · L^{-1} est : $pH = -\log\left(\dfrac{[H_3O^+]}{c^\circ}\right) = -\log\left(\dfrac{0{,}010}{1}\right)$ soit $pH = 2$.

• La concentration en ions oxonium d'une solution de pH = 8,5 est : $[H_3O^+] = c^\circ \times 10^{-pH} = 1 \times 10^{-8{,}5}$ soit $[H_3O^+] = 3{,}2 \times 10^{-9}$ mol · L^{-1}.

Le pH est une **fonction décroissante** de la concentration en ions oxonium H_3O^+ : plus la concentration $[H_3O^+]$ est élevée, plus le pH est faible.

Le pH de l'eau pure est égal à 7, cela signifie que $[H_3O^+] = 10^{-7}$ mol · L^{-1}.

Détermination par la mesure

Le papier pH permet d'évaluer le pH d'une solution aqueuse avec une **précision** sur la mesure **d'une unité**.

Pour plus de précision, on utilise un **pH-mètre** (FIG. 1). La mesure est fiable pour des pH variant entre 1 et 13, soit pour des concentrations en ions H_3O^+ variant entre 10^{-1} et 10^{-13} mol · L^{-1}. L'incertitude sur la mesure est alors de **0,1 unité**.

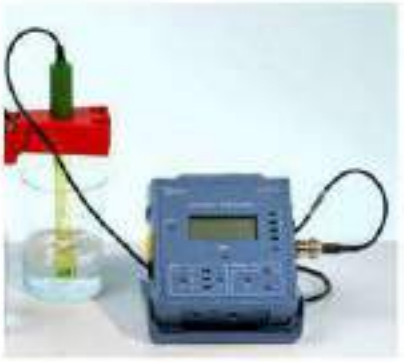


FIG. 1 Un pH-mètre.

Il est possible de tester la relation entre le pH et la concentration en ions oxonium apportés en mesurant le pH de solutions d'acide chlorhydrique (H_3O^+ (aq), Cl^- (aq)), obtenues par dilutions successives d'un facteur 10.

Le diagramme de Flood (FIG. 2) est la représentation graphique de la fonction :

$$\mathbf{pH = f\left(-\log\left(\dfrac{[H_3O^+]}{c^\circ}\right)\right)}$$

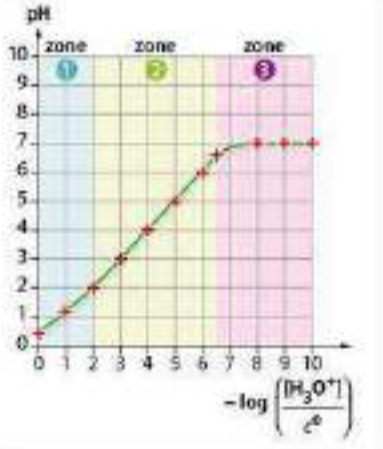


FIG. 2 Diagramme de Flood de l'acide chlorhydrique.

On y distingue trois zones.

• **Zone 1** : pour de faibles dilutions, la relation $pH = -\log\left(\dfrac{[H_3O^+]}{c^\circ}\right)$ n'est pas valide.

• **Zone 2** : pour des concentrations en quantité de matière comprises entre 10^{-2} et $10^{-6{,}5}$ mol · L^{-1}, cette relation est valide.

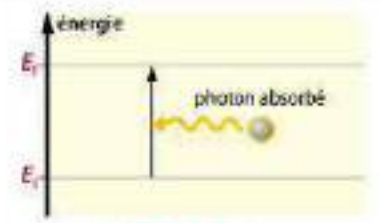
• **Zone 3** : pour de fortes dilutions, l'eau solvant impose son pH = 7.

2 Identification par spectroscopie

Principe de la spectroscopie

Les **niveaux d'énergie** de la matière sont quantifiés. La lumière peut être considérée comme une onde électromagnétique ou un ensemble de particules : les **photons**. Un photon ne peut être absorbé par une molécule (ou par un atome) que si son énergie correspond exactement à celle permettant un changement de niveau d'énergie dans la molécule (ou l'atome) (FIG. 3).

La **spectroscopie**, par analyse de la fréquence des ondes absorbées, permet d'obtenir des informations sur les niveaux d'énergie des espèces chimiques, donc sur la **structure de la matière**.



$\Delta E = E_f - E_i = h \cdot \nu$

h étant la constante de Planck

FIG. 3 Absorption d'un photon de fréquence ν par de la matière.

Spectroscopie UV-visible : identification d'espèces

En spectroscopie **UV-visible**, l'énergie du photon absorbé est gagnée par les électrons. L'**absorbance**, grandeur sans unité, mesure la capacité d'un milieu à absorber la lumière qui le traverse. À l'aide d'un **spectrophotomètre**, on détermine, pour chaque radiation lumineuse, l'absorbance de la solution (FIG. 4).

Le **spectre d'absorption** obtenu représente l'absorbance *A* de la solution en fonction de la longueur d'onde λ. Il est caractéristique de la solution étudiée et permet ainsi d'identifier l'**espèce** dissoute dans la solution.

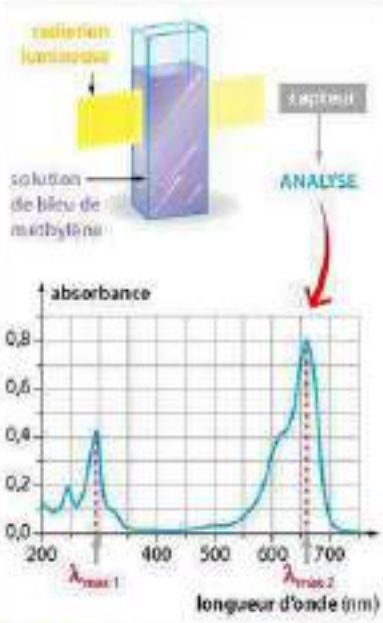


FIG. 4 Principe de la spectroscopie UV-visible appliqué à l'étude d'une solution de bleu de méthylène.

EXEMPLE

Le spectre obtenu (FIG. 4) caractérise le bleu de méthylène. Il comporte notamment un maximum d'absorption dans le domaine UV ($\lambda_{max\,1}$ = 295 nm) et un autre dans le visible ($\lambda_{max\,2}$ = 660 nm).

Spectroscopie IR : identification de groupes

Lorsque les photons incidents sont dans le domaine de l'**infrarouge**, l'énergie absorbée fait vibrer les atomes de la molécule autour des liaisons covalentes (FIG. 5).

La **spectroscopie IR** apporte des informations sur le type de liaisons, donc permet d'identifier les **groupes caractéristiques** présents dans la molécule étudiée.

Un **spectre IR** représente la transmittance *T* en fonction du nombre d'onde $\bar{\nu}$. Les **pics** (ou **bandes**) observés correspondent donc aux **longueurs d'onde** absorbées (FIG. 6).

La **transmittance** *T* (sans unité mais exprimée en %) est le quotient de l'intensité de la radiation transmise par l'intensité de la radiation incidente.

Le **nombre d'onde** $\bar{\nu}$ est l'inverse de la longueur d'onde λ :

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda}$$

Si l'unité de la longueur d'onde λ est le cm, le nombre d'onde $\bar{\nu}$ s'exprime en cm^{-1}.

EXEMPLE

La zone 1 du spectre d'absorption IR (FIG. 6) pour $\bar{\nu} > 1\,300\ cm^{-1}$ comporte les bandes d'absorption caractéristiques des différents types de liaisons.

La zone 2 (FIG. 6) pour $\bar{\nu} < 1\,300\ cm^{-1}$ est appelée *zone des empreintes digitales*, les bandes y sont difficilement exploitables, mais elle permet d'identifier une molécule par comparaison avec un **spectre de référence**.

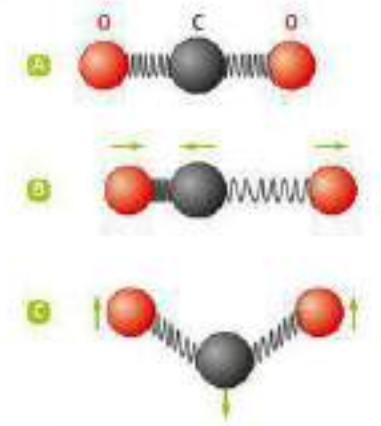
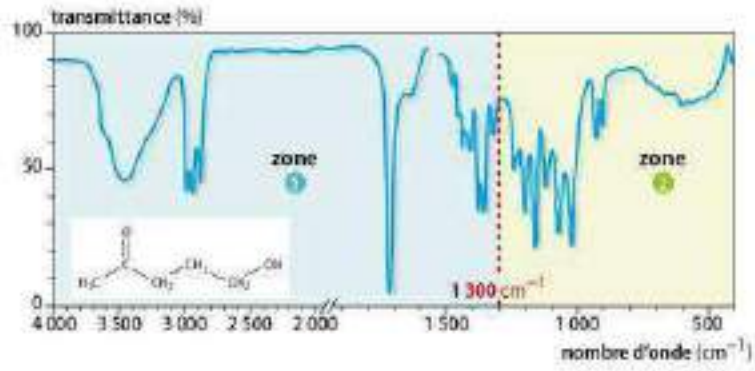


FIG. 5 Différents mouvements de vibration possibles (B, C) pour une molécule de dioxyde de carbone A.



◀ FIG. 6 Spectre d'absorption IR de la 5-hydroxypentan-2-one.

Famille	Liaison	Nombre d'onde (en cm^{-1})
Alcools	O—H	3 200 - 3 700
Cétones	C=O	1 705 - 1 725
Aldéhydes	C—H C=O	2 650 - 2 830 1 680 - 1 740
Acides carboxyliques	O—H C=O	2 500 - 3 200 1 740 - 1 800

FIG. 7 Extrait de tables de données spectroscopiques.

Des **tables de données spectroscopiques** (FIG. 7) permettent d'attribuer les bandes d'absorption à des groupes caractéristiques d'atomes.

EXEMPLE

Sur le spectre d'absorption IR de la 5-hydroxypentan-2-one (FIG. 6), la bande large et forte autour de 3 500 cm^{-1} peut être attribuée grâce aux tables (FIG. 7) au **groupe hydroxyle O—H** et la bande fine et forte à 1 720 cm^{-1} au **groupe carbonyle C=O** des cétones.

3 Mesures physiques en solution

Loi de Beer-Lambert

L'**absorbance** d'une solution dépend de la nature de la solution, de la longueur d'onde (FIG. 4), de l'épaisseur de solution traversée par la lumière, de la température et de la concentration de la solution.

La **loi de Beer-Lambert** établit une proportionnalité entre l'absorbance et la concentration en quantité de matière d'une solution (FIG. 8).

absorbance (sans unité) → $A = k \cdot c$ ← concentration (en mol · L^{-1})

coefficient de proportionnalité (en $L \cdot mol^{-1}$)

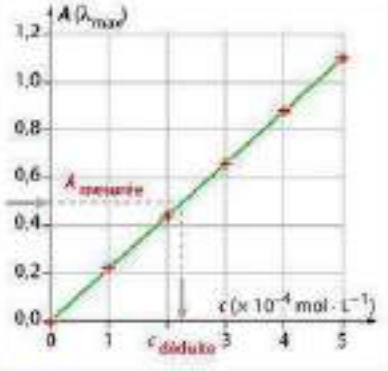


FIG. 8 L'absorbance A d'une solution de bleu de méthylène est proportionnelle à sa concentration c.

Afin d'augmenter la précision des mesures du spectrophotomètre, il est important d'établir le spectre d'absorption de la solution étudiée, puis de se placer à la longueur d'onde du maximum d'absorption λ_{max}.

De plus, l'**absorbance mesurée** doit être suffisamment **faible** pour être déterminée correctement, ainsi les concentrations en quantité de matière des solutions doivent rester inférieures à 10^{-2} mol · L^{-1}.

EXEMPLE

Dans le cas du bleu de méthylène, $\lambda_{max\,2}$ = 660 nm (FIG. 4) et les concentrations utilisées sont de l'ordre de 10^{-4} mol · L^{-1} (FIG. 8).

L'absorbance est une **grandeur additive** : si une solution est un mélange de plusieurs espèces chimiques e_1, e_2, ..., e_n de concentrations respectives $c_1, c_2, ..., c_n$, l'absorbance de la solution vaut $A = A_1 + A_2 + ... + A_n = \sum_{i=1}^{n} k_i \cdot c_i$.

Loi de Kohlrausch

Pour mesurer la conductance (FIG. 9), deux électrodes sont immergées dans une solution ionique, soumises à une tension électrique U. Un courant d'intensité I circule dans le circuit, donc dans la solution où les ions, libres de se déplacer, portent les charges.

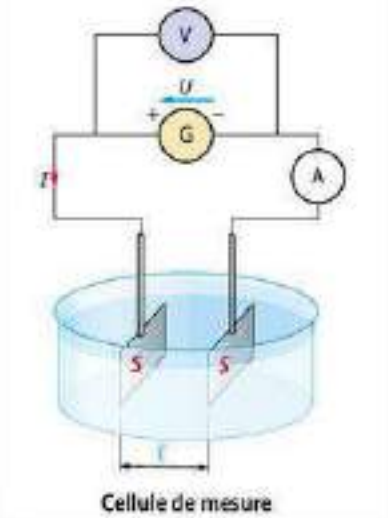


FIG. 9 Dispositif expérimental de mesure de la conductance d'une solution ionique.

La **conductance** G d'une solution, exprimée en siemens (S), est l'inverse de sa résistance R. Elle traduit sa capacité à **conduire le courant électrique**.

$$G = \frac{1}{R} = \frac{I}{U}$$

conductance (en S) ; résistance (en Ω) ; intensité du courant (en A) ; tension (en V)

■ La conductance d'une solution dépend de la température, de la nature et de la concentration de la solution étudiée, mais aussi de la géométrie de la cellule de mesure (FIG. 9). Pour s'affranchir des dimensions de la cellule, on utilise souvent la **conductivité** σ de la solution.

La **conductivité** σ est une grandeur proportionnelle à la conductance. Elle ne dépend que de la température et de la nature de la solution.

$$\sigma = \frac{\ell}{S} \cdot G$$

conductivité (en S · m⁻¹) ; écart entre les électrodes (en m) ; surface des électrodes (en m²) ; conductance (en S)

La conductivité σ et la **conductivité molaire ionique** λ_i sont reliées par la **loi de Kohlrausch** :

$$\sigma = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \cdot [X_i]$$

conductivité (en S · m⁻¹) ; concentration de l'ion i (en mol · m⁻³) ; conductivité molaire ionique de l'ion i (en S · m² · mol⁻¹)

La conductivité molaire ionique dépend de la température (FIG. 10).

Ion	Conductivité molaire ionique λ (en S · m² · mol⁻¹)
H_3O^+	$35{,}0 \times 10^{-3}$
Na^+	$5{,}0 \times 10^{-3}$
K^+	$7{,}4 \times 10^{-3}$
HO^-	$19{,}8 \times 10^{-3}$
Cl^-	$7{,}6 \times 10^{-3}$
Br^-	$7{,}8 \times 10^{-3}$

FIG. 10 Conductivités molaires ioniques de quelques ions à 25 °C.

■ La loi de Kohlrausch n'est valable que pour des concentrations en quantité de matière inférieures à 10^{-2} mol · L^{-1}.

EXEMPLE

La conductivité σ d'une solution de chlorure de sodium (Na^+ (aq), Cl^- (aq)) de concentration en quantité de matière de soluté apporté c est :

$\sigma = \lambda_{Na^+} \cdot [Na^+] + \lambda_{Cl^-} \cdot [Cl^-] = \lambda_{Na^+} \cdot c + \lambda_{Cl^-} \cdot c = (\lambda_{Na^+} + \lambda_{Cl^-}) \cdot c$

La dernière égalité établit une relation de proportionnalité entre conductivité σ et concentration en quantité de matière de soluté apporté c.

REPÈRE

Les concentrations en quantité de matière sont exprimées en **mol · m⁻³** pour le calcul de la conductivité σ.

■ La conductivité σ et la conductance G d'une solution sont des **grandeurs proportionnelles** à la concentration en soluté apporté c (FIG. 11).

Dosages par étalonnage

■ L'absorbance, la conductance ou la conductivité sont des grandeurs mesurables, utiles pour effectuer des **dosages par étalonnage**.

■ À partir d'une solution-mère de concentration $c_{mère}$ connue, on prépare par dilution une série de solutions-filles de concentrations c_{fille} connues, on parle de **gamme étalon**. Puis, on trace la **courbe d'étalonnage** $A = f(c)$ (FIG. 8), $G = f(c)$ (FIG. 11) ou $\sigma = f(c)$.

Pour déterminer la concentration inconnue, on mesure l'absorbance, la conductance ou la conductivité de la solution à doser. De la courbe d'étalonnage, on déduit la concentration de l'espèce chimique (FIG. 8) (FIG. 11).

■ Il est nécessaire de faire coïncider les concentrations de la gamme étalon avec celle de la solution inconnue. De plus, les mesures et les lois utilisées ne sont valables que pour des concentrations en quantité de matière inférieures à 10^{-2} mol · L^{-1}.

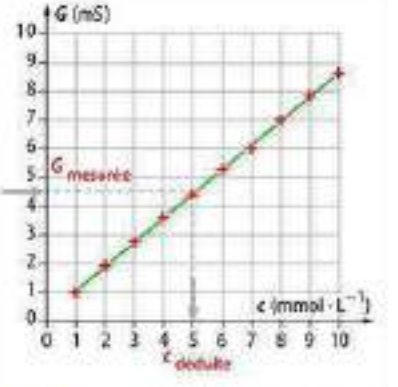


FIG. 11 Courbe d'étalonnage $G = f(c)$ et détermination d'une concentration inconnue.

1 pH d'une solution

Les relations sont valides pour $[H_3O^+] \leqslant 10^{-2}$ mol · L^{-1}.

Calcul du pH à partir de $[H_3O^+]$:

$$pH = -\log\left(\frac{[H_3O^+]}{c^\circ}\right)$$

- $[H_3O^+]$: concentration en ions oxonium (en mol · L^{-1})
- pH : pH de la solution (sans unité)
- c° : concentration standard $c^\circ = 1$ mol · L^{-1}

Calcul de $[H_3O^+]$ à partir du pH :

$$[H_3O^+] = c^\circ \times 10^{-pH}$$

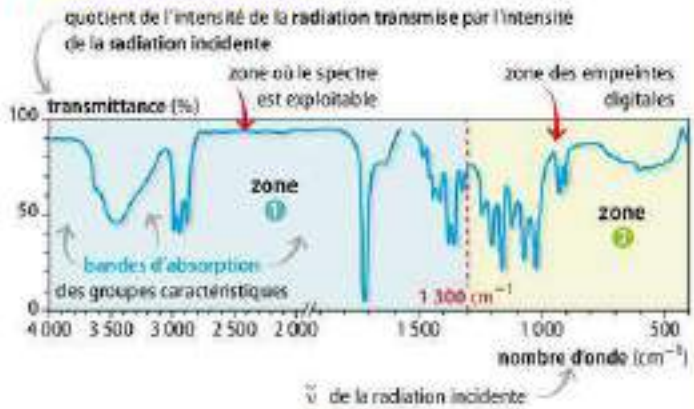
- pH : pH de la solution (sans unité)
- $[H_3O^+]$: concentration en ions oxonium (en mol · L^{-1})
- c° : concentration standard $c^\circ = 1$ mol · L^{-1}

2 Identification par spectroscopie

Spectre d'absorption UV-visible de la solution étudiée



Spectre d'absorption IR de la solution étudiée



$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda}$$

- $\tilde{\nu}$: nombre d'onde (en cm^{-1})*
- λ : longueur d'onde (en cm)*

* si λ est en cm, alors $\tilde{\nu}$ est en cm^{-1}.

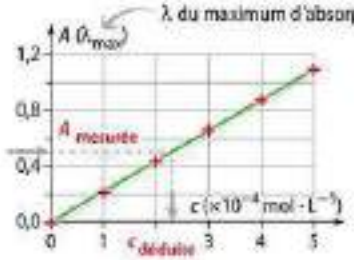
3 Mesures physiques en solution

Lois valables pour $c < 10^{-2}$ mol · L^{-1}.

Loi de Beer-Lambert

$$A = k \cdot c$$

- A : absorbance (sans unité)
- k : coefficient de proportionnalité (en L · mol^{-1})
- c : concentration (en mol · L^{-1})



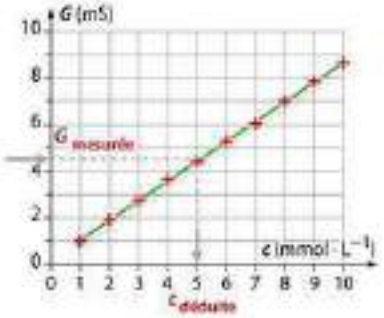
Loi de Kohlrausch

$$G = \frac{1}{R} = \frac{I}{U}$$

- G : conductance (en S)
- R : résistance (en Ω)
- I : intensité du courant (en A)
- U : tension (en V)

$$\sigma = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \cdot [X_i]$$

- σ : conductivité (en S · m^{-1})
- $[X_i]$: concentration de l'ion i (en mol · m^{-3})
- λ_i : conductivité molaire ionique de l'ion i (en S · m^2 · mol^{-1})



Vérifier l'essentiel EN AUTONOMIE

Pour chaque question, choisir la ou les bonnes réponses. ➡ SOLUTIONS EN PAGE 593

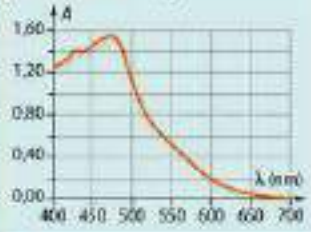
Flash PAGE corrigés détaillés

Flash PAGE QCM interactifs

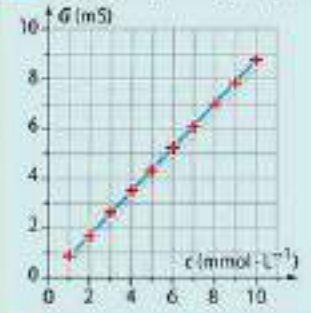
1 pH d'une solution

	A	B	C
1 Le pH d'une solution de concentration en ions oxonium $[H_3O^+]$ égale à $2,5 \times 10^{-9}$ mol · L^{-1} est :	2,5	12,2	8,6
2 La concentration en ions oxonium d'une solution de pH = 3,2 vaut :	$1,2 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1}	$6,3 \times 10^{-4}$ mol · L^{-1}	$10^{-3,2}$ mol · L^{-1}

2 Identification par spectroscopie

	A	B	C
3 Ce spectre du diiode permet de dire que : 	la solution de diiode absorbe dans le visible.	la solution de diiode est caractérisée par λ_{max} = 470 nm.	la solution de diiode est caractérisée par les valeurs de son absorbance.
4 La spectroscopie infrarouge IR permet :	de connaître la formule brute d'une molécule.	de déterminer la pureté d'une espèce.	d'identifier des groupes d'atomes.
5 En abscisse d'un spectre IR, on trouve :	la longueur d'onde.	le nombre d'onde.	la fréquence.

3 Mesures physiques en solution

	A	B	C
6 La loi de Beer-Lambert :	établit que l'absorbance dépend de la longueur d'onde.	caractérise la nature d'une solution.	établit une proportionnalité entre absorbance et concentration.
7 Ce graphique indique que : 	la loi de Kohlrausch est vérifiée.	la conductance est proportionnelle à la concentration.	la conductance dépend de la tension utilisée.
8 La conductance d'une solution de même nature que celle de la question précédente vaut 7 mS.	Sa concentration est de 8 mmol · L^{-1}.	On ne peut pas en déduire sa concentration.	Sa concentration est de 0,006 mol · L^{-1}.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Acquérir les bases

1 pH d'une solution

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Savoir calculer le pH d'une solution connaissant la concentration d'ions oxonium $[H_3O^+]$ et réciproquement.

➥ Acquérir les bases : 10 12 ➥ S'entraîner : 20

9 Préparation d'une solution diluée

Une solution d'acide chlorhydrique de concentration en quantité de matière d'ions oxonium :
$[H_3O^+] = 1{,}5 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1} est diluée d'un facteur 100.

1. Quel est le pH de la solution initiale ?
2. Quel est le pH de la solution diluée ?
3. Quelle est la solution la plus acide des deux ?

10 Qualité de l'eau d'une piscine

Le pH de l'eau d'une piscine doit se situer autour de 7,4.

1. Quelle est la concentration en quantité de matière d'ions oxonium de l'eau de cette piscine ?
2. On mesure un pH à 7,6. Peut-on revenir à une valeur correcte de pH à l'aide d'acide chlorhydrique (H_3O^+ (aq), Cl^- (aq)) ?

11 pH de quelques solutions

Recopier et compléter le tableau suivant.

pH	$[H_3O^+]$ (en mol · L^{-1})	Solution acide ou basique ?
12,3		
	$1{,}0 \times 10^{-7}$	
	$3{,}2 \times 10^{-9}$	
4,2		

12 Boissons au cola

Des dosages permettent de mesurer les concentrations en quantité de matière d'ions oxonium $[H_3O^+]$ de différentes boissons au cola. On trouve :

$$6{,}3 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} < [H_3O^+] < 3{,}2 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

1. Quel est le pH correspondant à chacune des valeurs extrêmes mesurées ?
2. En déduire un encadrement du pH des boissons au cola dosées.
3. Ces boissons sont-elles acides ou basiques ?

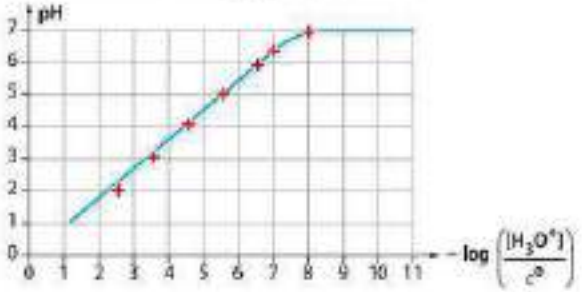
13 Préparation d'une solution-mère CALCUL MENTAL

L'addition de $2{,}0 \times 10^{-4}$ mol de chlorure d'hydrogène gazeux HCl (g) à 200 mL d'eau donne de l'acide chlorhydrique (H_3O^+ (aq), Cl^- (aq)).

1. Quelle est la concentration en quantité de matière d'ions oxonium $[H_3O^+]$ apportés ?
2. En déduire le pH de la solution obtenue.

14 pH et dilutions

Des élèves de terminale ont réalisé en TP une série de mesures conduisant au graphique suivant.



1. Pour quelle gamme de concentrations la relation permettant de calculer le pH est-elle valable ?
2. Expliquer la forme de la courbe pour les solutions dont les valeurs en abscisse sont supérieures à 8.
3. Quel est le facteur de dilution lorsque l'on passe d'une solution de pH = 2 à une solution de pH = 5 ?

2 Identification par spectroscopie

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Spectroscopie UV-visible

- Exploiter un spectre UV-visible pour identifier une espèce chimique.

➥ Acquérir les bases : 15 16

Spectroscopie infrarouge

- Exploiter un spectre infrarouge pour identifier un groupe caractéristique.

➥ Acquérir les bases : 17 ➥ S'entraîner : 25 28 33

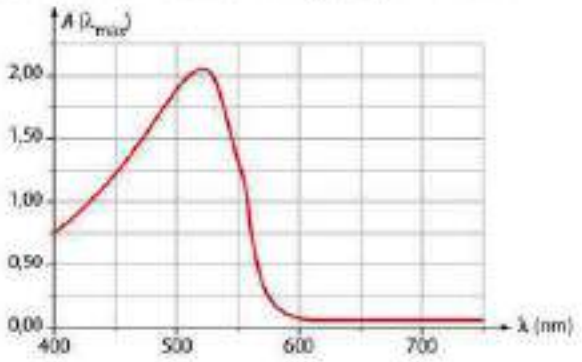
DONNÉES

- Table des bandes IR : en rabat de couverture.

15 Colorant rouge

On dispose au laboratoire d'une solution rouge-orangée d'un colorant dont l'étiquette est effacée.

À l'aide d'un spectrophotomètre, on enregistre son spectre d'absorption UV-visible, voici le graphique obtenu :



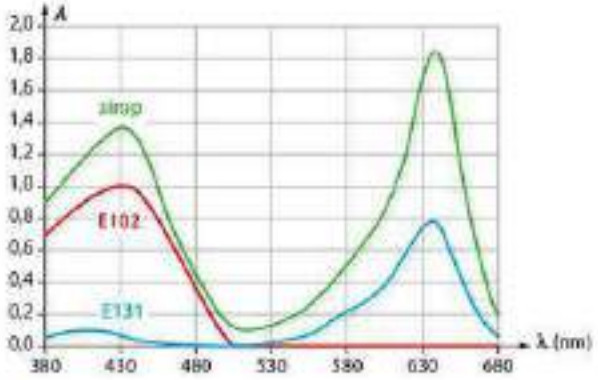
Données : *longueurs d'onde λ_{max} au maximum d'absorption.*

Colorant	rouge ponceau	rouge cochenille	rouge Allura
λ_{max} (en nm)	505	525	515

1. Quelle est la longueur d'onde au maximum d'absorption du colorant trouvé au laboratoire ?
2. De quel colorant s'agit-il ?

16 Sirop de menthe

On réalise à l'aide d'un spectrophotomètre les spectres d'absorption UV-visible d'un sirop de menthe et de deux colorants alimentaires, les graphiques obtenus sont présentés ci-dessous.



1. Déterminer la (ou les) longueur(s) d'onde au maximum d'absorption de chacun des échantillons dosés.
2. En déduire l'origine de la couleur du sirop de menthe.

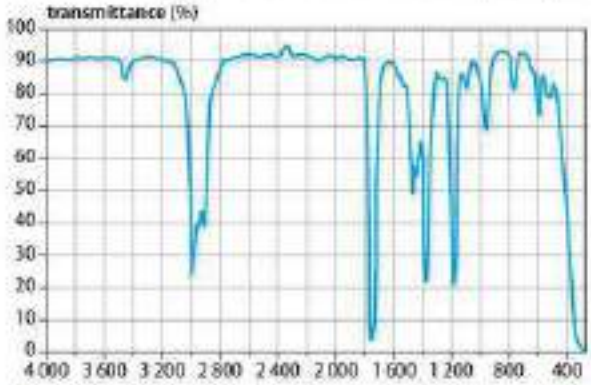
17 Bande caractéristique

On considère la bande d'absorption de nombre d'onde $\bar{\nu} = 3\,500\ cm^{-1}$ dans un spectre infrarouge.

1. À quelle famille chimique cette bande est-elle associée ?
2. Calculer la longueur d'onde correspondante. Cette radiation serait-elle visible à l'œil nu ?

18 Un solvant

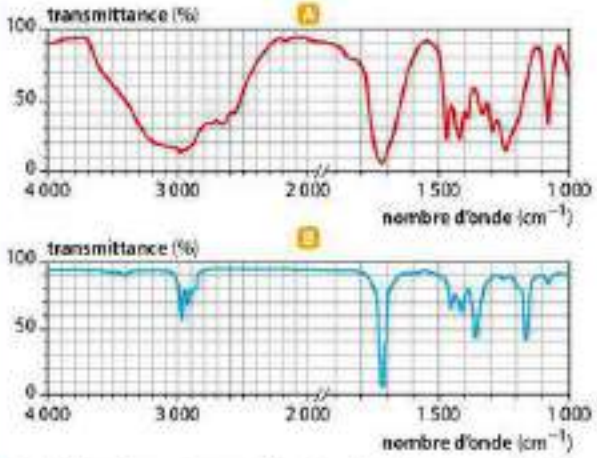
On dispose du spectre infrarouge suivant d'un solvant de formule brute C_4H_8O, utilisé dans l'industrie du plastique.



1. Préciser la grandeur et l'unité « représentées » en abscisse du spectre fourni.
2. Attribuer les bandes d'absorption du spectre infrarouge à des groupes caractéristiques d'atomes.
3. En déduire la formule semi-développée et le nom du solvant étudié.

19 Association

On donne ci-dessous les spectres infrarouge de l'acide butanoïque et du butanal.



1. Écrire les formules semi-développées de chaque molécule.
2. Rechercher les nombres d'onde $\bar{\nu}$ des bandes caractéristiques pour ces molécules.
3. Identifier le spectre des molécules étudiées.

3 Mesures physiques en solution

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Absorbance ; loi de Beer-Lambert
- Exploiter la loi de Beer-Lambert pour déterminer une concentration ou une quantité de matière.
- Citer son domaine de validité.

→ Acquérir les bases : 21 → S'entraîner : 24

Conductance, conductivité ; loi de Kohlrausch
- Exploiter la loi de Kohlrausch pour déterminer une concentration ou une quantité de matière.
- Citer son domaine de validité.

→ Acquérir les bases : 26 → S'entraîner : 27 28 35

20 Gamme étalon

On cherche à préparer une gamme étalon à partir d'une solution-mère de concentration $5 \times 10^{-2}\ mol \cdot L^{-1}$.

On réalise pour cela une série de dilutions.

1. Quel est le protocole pour réaliser une dilution ?
2. Quelle grandeur se conserve lors d'une dilution ?
3. Recopier et compléter le tableau suivant.

Volume V_m (en mL) de solution-mère prélevé	Volume V_f (en mL) de solution-fille	Concentration c_f (en mmol · L⁻¹) de solution-fille
10	50	
20	50	
30	50	
40	50	

4. Cette gamme de solutions peut-elle être utilisée pour vérifier la loi de Beer-Lambert ? Justifier la réponse.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

21 Dosage spectrophotométrique

On veut réaliser le dosage d'une solution de β-carotène. Un spectrophotomètre, réglé sur une longueur d'onde $\lambda = 450$ nm, a permis de mesurer l'absorbance A de solutions de différentes concentrations c (en mmol · L^{-1}).

Ces mesures sont regroupées dans le tableau suivant.

c	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
A	0,25	0,60	0,90	1,15	1,45	1,75

1. Comment la longueur d'onde de réglage du spectrophotomètre a-t-elle été choisie ?
2. Tracer le graphique $A = f(c)$.
3. Commenter la courbe tracée en citant la loi vérifiée.
4. On mesure l'absorbance A_S d'une solution S de β-carotène de concentration inconnue. On trouve : $A_S = 1{,}25$. Quelle est la concentration en quantité de matière c_S de cette solution ?

22 Conductance G et conductivité σ

On mesure la conductance d'une solution d'hydroxyde de sodium (Na^+ (aq), OH^- (aq)) à l'aide d'électrodes de surface $S = 1$ cm^2 et espacées de $\ell = 9$ mm, on obtient : $G = 1{,}60$ mS.

Données : • $\sigma = \frac{\ell}{S} \cdot G$.

• *Conductivités molaires ioniques :* $\lambda_{Na^+} = 5{,}01$ mS · m^2 · mol^{-1} ; $\lambda_{HO^-} = 19{,}9$ mS · m^2 · mol^{-1} .

1. Réaliser un schéma du dispositif expérimental ayant permis la mesure.
2. Calculer la valeur de la conductivité de la solution.
3. En déduire la concentration en quantité de matière de soluté dans la solution.

23 Mesure électrique

On réalise le montage ci-après avec différentes solutions de chlorure de potassium (K^+ (aq), Cl^- (aq)).

Le générateur impose une tension de 5 V. Les résultats des mesures se trouvent dans le tableau fourni.



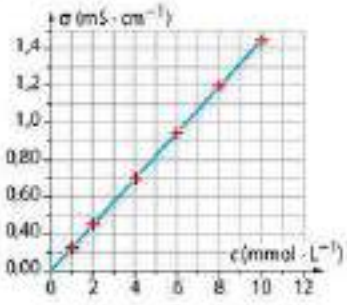
1. Recopier et compléter la troisième ligne du tableau.

Concentration c (en mmol · L^{-1})	10	20	30	40	50
Intensité I (en A)	8	16,5	23,5	32	41
Conductance G (en mS)					

2. Tracer le graphique $G = f(c)$.
3. Commenter la courbe tracée en citant la loi vérifiée.
4. On mesure avec le même montage l'intensité du courant I_S traversant une solution S de concentration inconnue. On trouve : $I_S = 28$ mA. Quelle est la concentration en quantité de matière de soluté c_S de cette solution ?

24 Dosage conductimétrique

On dose par étalonnage une solution de chlorure de calcium. Les mesures réalisées avec un conductimètre permettent de tracer ce graphique.



1. Commenter la courbe tracée en citant la loi vérifiée. On mesure la conductivité σ d'une solution S de concentration inconnue diluée 1 000 fois. On trouve : $\sigma_S = 1{,}4$ mS · cm^{-1}.
2. Pourquoi la solution est-elle diluée avant la mesure ?
3. Quelle est la concentration en quantité de matière de soluté c_S de la solution inconnue ?

Faire le point avant d'aller plus loin

PRÉPA BAC

Pour vérifier ses connaissances, répondre aux questions suivantes (sans regarder le cours !)

- Écrire la relation entre le pH et la concentration en quantité de matière d'ions oxonium, et expliciter chaque grandeur et son unité.
- Décrire le protocole expérimental permettant de réaliser une dilution d'un facteur 10 en nommant la verrerie utilisée.
- Décrire une méthode spectroscopique d'identification d'espèces chimiques en insistant sur les grandeurs importantes.
- Expliciter les grandeurs et unités des axes d'un spectre infrarouge.
- Décrire la méthode d'exploitation d'un spectre infrarouge.
- Énoncer la loi de Beer-Lambert et préciser pourquoi elle peut être utile pour déterminer une concentration.
- Décrire le montage expérimental permettant la mesure d'une conductance.
- Écrire la loi de Kohlrausch appliquée à l'acide chlorhydrique (H_3O^+ (aq), Cl^- (aq)) de concentration c en quantité de matière de soluté apporté.

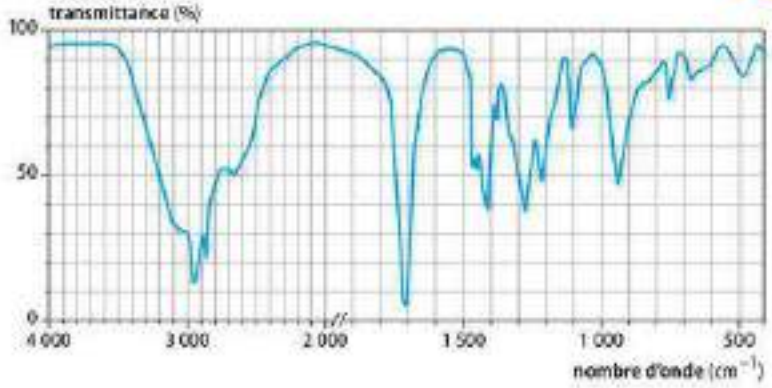
Retrouver ces questions en version numérique

Flash PAGE cartes mémos

Exercice résolu EN AUTONOMIE

25 Identification de groupes caractéristiques

On a enregistré ce spectre infrarouge d'une molécule linéaire de formule brute $C_5H_{10}O_2$.



Données : *table des bandes IR, en rabat v de couverture.*

1. **Expliquer** la signification des grandeurs qui apparaissent en abscisse et en ordonnée du spectre, et donner leur unité.

2. **Déterminer** les groupes caractéristiques présents dans la molécule étudiée.

3. **En déduire** la (ou les) formule(s) développée(s) possible(s) de cette molécule et la (ou les) nommer.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- La **formule brute** étant insuffisante pour décrire une molécule, une étude en spectroscopie infrarouge est nécessaire.

LES VERBES D'ACTION

- **Expliquer** : donner une justification à une observation ou à une affirmation.
- **Déterminer** : mettre en œuvre une stratégie pour trouver un résultat.
- **En déduire** : intégrer le résultat précédent pour répondre.

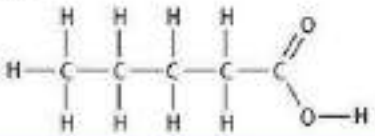
EXEMPLE DE RÉDACTION

1. En ordonnée, la grandeur correspond à la transmittance, sans unité mais exprimée en pourcentage. Elle traduit la capacité d'un échantillon à transmettre la lumière. On trouve en abscisse le nombre d'onde exprimé en cm^{-1}, c'est l'inverse de la longueur d'onde.

2. On repère une bande fine et forte vers 1 740 cm^{-1} qui permet, en consultant la table des bandes IR, d'identifier **une liaison C=O**. Ce groupe est commun à plusieurs familles de molécules.

La bande large forte vers 2 980 cm^{-1} caractérise le **groupe O—H** d'un acide carboxylique.

3. La molécule étant linéaire, il n'y a ici qu'une formule développée possible, celle de l'**acide pentanoïque** :



QUELQUES CONSEILS

2. La formule brute renseigne sur le nombre d'atomes d'oxygène, donc sur le nombre de bandes contenant de l'oxygène, à rechercher.

3. Une même formule brute peut correspondre à plusieurs formules développées.

EXERCICE SIMILAIRE

26 Des isomères

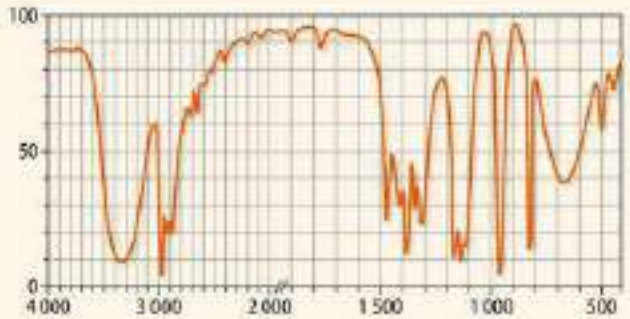
On a enregistré le spectre infrarouge ci-contre d'une molécule organique de formule brute C_3H_6O.

Données : *table des bandes IR, en rabat v de couverture.*

1. Préciser à quoi correspondent les grandeurs et unités qui ne figurent pas ici sur les axes du spectre fourni.

2. Sur ce spectre, identifier la bande caractéristique et l'associer à un groupe d'atomes.

3. En déduire la (ou les) formule(s) semi-développée(s) possible(s) de la molécule étudiée et la (ou les) nommer.



Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

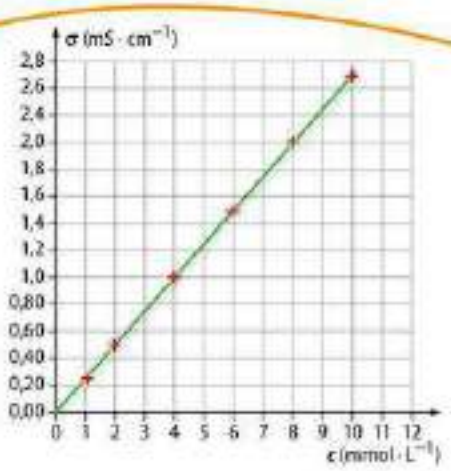
Exercice résolu EN AUTONOMIE

27 Dosage conductimétrique

On souhaite doser par étalonnage une solution obtenue par dissolution de chlorure de calcium $CaCl_2$ (s) dans l'eau.

À partir d'une gamme étalon, on trace le graphique ci-contre $\sigma = f(c)$. Puis, on mesure la conductivité d'une solution de concentration inconnue c' diluée 10 fois, on trouve :

$$\sigma = 1{,}7 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$$



1. Écrire l'équation de dissolution du chlorure de calcium dans l'eau.

2. **Déterminer** la concentration en quantité de matière de soluté apporté de la solution inconnue.

3. **En déduire** les concentrations en quantité de matière des ions présents dans la solution inconnue.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- Le **graphique** traduit la proportionnalité entre conductivité et concentration (loi de Kohlrausch).

LES VERBES D'ACTION

- **Déterminer** : mettre en œuvre une stratégie pour trouver un résultat.
- **En déduire** : intégrer le résultat précédent pour répondre.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. L'équation de dissolution du soluté (chlorure de calcium dans l'eau) s'écrit :

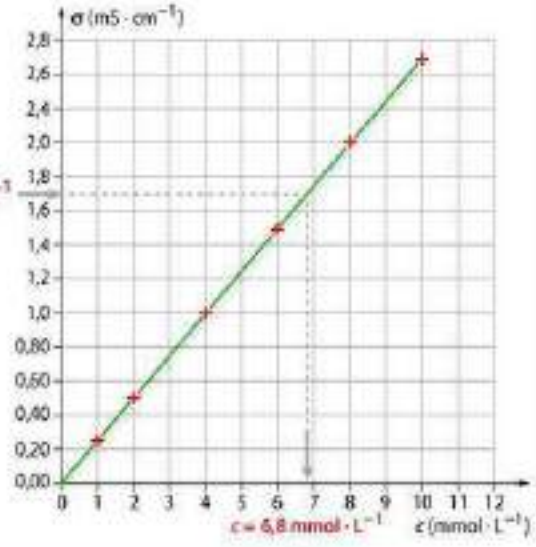
$$\mathbf{CaCl_2\,(s) \rightarrow Ca^{2+}\,(aq) + 2\,Cl^-\,(aq)}$$

2. La courbe d'étalonnage fournie permet par lecture graphique de déterminer la concentration en quantité de matière de soluté de la solution diluée : $c = 6{,}8$ mmol · L^{-1}.

La solution initiale étant **10 fois** plus concentrée, la concentration c' vaut : $c' = \mathbf{10} \times c$

$$c' = \mathbf{10} \times 6{,}8 \times 10^{-3}$$

$$\mathbf{c' = 0{,}068 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}}$$



3. On en déduit :

- $[Ca^{2+}\,(aq)] = c'$ donc $\mathbf{[Ca^{2+}\,(aq)] = 0{,}068 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}}$;
- $[Cl^-\,(aq)] = 2 \times c' = 2 \times 0{,}068$ donc $\mathbf{[Cl^-\,(aq)] = 0{,}136 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}}$.

QUELQUES CONSEILS

1. Tenir compte de l'électroneutralité de la solution.

3. La stœchiométrie de l'équation de dissolution indique les proportions entre la concentration en quantité de matière de soluté et celle de chaque ion en solution.

EXERCICE SIMILAIRE

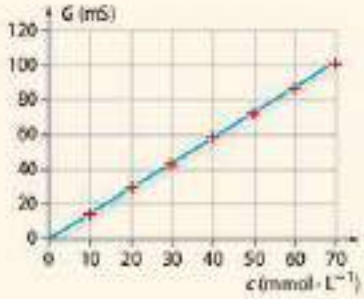
28 Médicament antique

Le sulfate de magnésium de formule chimique $MgSO_4$ (s) est utilisé en solution aqueuse comme un puissant laxatif.

1. Quelles sont les espèces chimiques présentes dans une telle solution ?

2. À partir de la courbe d'étalonnage ci-contre, déterminer la concentration en quantité de matière de soluté apporté d'une solution S dont la conductance est $G_S = 70$ mS.

3. En déduire les concentrations en quantité de matière des ions présents dans la solution S.



S'entraîner pour maîtriser

SAVOIR RÉDIGER

29 Proposer une correction de la solution donnée par un élève à l'énoncé.

Énoncé

Quel est l'avenir de l'automobile ?

Si beaucoup d'industriels misent sur les batteries électriques, une autre possibilité semble émerger : la pile à hydrogène. Particulièrement peu polluante, cette technique nécessite la production industrielle de dihydrogène H_2 par électrolyse. Cette méthode de production convertit l'énergie électrique en énergie chimique : deux électrodes immergées dans une solution permettent à un courant électrique de circuler.

Les réactions électrochimiques qui ont lieu aux électrodes sont d'autant plus efficaces que l'intensité circulant dans le circuit est importante.

Données : *conductivités molaires ioniques* λ

$\lambda_{Na^+} = 5{,}0\ mS \cdot m^2 \cdot mol^{-1}$; $\lambda_{H_3O^+} = 35{,}0\ mS \cdot m^2 \cdot mol^{-1}$; $\lambda_{Cl^-} = 7{,}6\ mS \cdot m^2 \cdot mol^{-1}$.

1. Quel est l'avantage de choisir une solution d'acide chlorhydrique (H_3O^+, Cl^-) plutôt qu'une solution de chlorure de sodium (Na^+, Cl^-) pour optimiser une électrolyse ?

2. Calculer la conductivité d'une solution d'acide chlorhydrique de concentration en quantité de matière de soluté apporté $c = 10^{-2}\ mol \cdot L^{-1}$.

3. Proposer une solution expérimentale permettant de multiplier par 10 l'intensité sans changer la valeur de la tension imposée aux bornes des électrodes.

Solution proposée par un élève

1. Comme $\lambda_{H_3O^+} > \lambda_{Na^+}$, l'intensité dans le circuit sera plus importante et le dégagement de H_2 plus efficace.

2. $\sigma = \lambda_{H_3O^+} \cdot [H_3O^+] + \lambda_{Cl^-} \cdot [Cl^-] = (\lambda_{H_3O^+} + \lambda_{Cl^-}) \cdot c$

$\sigma = (35{,}0 \times 10^{-3} + 7{,}6 \times 10^{-3}) \times 10^{-2} = 4{,}26 \times 10^{-2}\ S \cdot m^{-1}$) Vérifier l'unité de la concentration

3. Pour multiplier l'intensité par 10, il est possible de multiplier la conductance par 10.) Donner une solution expérimentale

30 Le pH

CULTURE DES SCIENCES



Le terme pH a été employé et défini pour la première fois en 1909 par le biologiste danois Sørensen (photo).

S'appuyant sur les travaux du chimiste suédois Arrhenius sur l'acidité et la basicité, il comprend que ce n'est pas l'acidité totale, mais la concentration « en ions hydrogène » qui influence la cinétique enzymatique des processus biologiques.

Assez rapidement, une relation mathématique, toujours utilisée aujourd'hui, entre pH et concentration en quantité de matière d'ions hydrogène est posée.

Chimistes et biologistes apprécient ce moyen simple de quantifier le caractère acido-basique d'une solution.

1. D'après le texte, quel est l'ion responsable de l'acidité d'une solution ?

2. Quel nom lui donne-t-on aujourd'hui ? Quelle est sa formule chimique ?

3. a. Rappeler la relation mathématique conduisant au calcul du pH.

b. Appliquer cette relation à une solution d'acide chlorhydrique de concentration en quantité de matière de soluté apporté $c = 0{,}10\ mol \cdot L^{-1}$.

4. Ce calcul est-il valide ? Expliquer pourquoi.

31 Blood sugar monitoring

Diabetes is a disease concerning the assimilation and storage of sugar in the body. A healthy person on an empty stomach has a blood sugar (glucose) level between 3.5 and 6.1 $mmol/L^{-1}$. In the laboratory, a standard range of glucose solutions is prepared and measured for absorbance:

Solution no.	1	2	3	4	5
Mass concentration (in g/L^{-1})	0.20	0.40	0.60	0.80	1.0
Absorbance	0.090	0.17	0.25	0.34	0.42

The analysis of a blood sample from a patient leads to a measurement of absorbance $A = 0.39$.

Data: *molar mass of glucose* $M = 180\ g/mol^{-1}$.

1. Describe the protocol for preparing 100 mL of solution no. 5 from solution no. 1.

2. Determine the mass concentration of glucose in this patient's blood.

3. What are the conclusions of the analysis?

32 De l'eau pure

TABLEUR-GRAPHEUR

Seules les solutions ioniques conduisent l'électricité. Pourtant, l'eau purifiée de toutes espèces minérales a une conductivité non nulle ! Cette apparente « anomalie » s'explique par son caractère amphotère.

On effectue au laboratoire une série de mesures de la valeur de la conductivité σ (en $\mu S \cdot m^{-1}$) de l'eau pure à l'aide d'un conductimètre à 25 °C.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Voici les résultats :

n°	1	2	3	4	5	6	7
σ	5,4	5,6	5,5	5,3	5,3	5,5	5,4
n°	8	9	10	11	12	13	14
σ	5,7	5,4	5,6	5,7	5,5	5,5	5,5
n°	15	16	17	18	19	20	
σ	5,3	5,5	5,6	5,7	5,5	5,5	

Données : *conductivités molaires ioniques λ*
$\lambda_{HO^-} = 19{,}8\ mS \cdot m^2 \cdot mol^{-1}$; $\lambda_{H_3O^+} = 35{,}0\ mS \cdot m^2 \cdot mol^{-1}$.

1. a. Rappeler les deux couples acide-base de l'eau.
b. Établir l'équation de la réaction expliquant la présence d'ions dans l'eau.
c. En déduire que les concentrations en quantité de matière des ions oxonium et hydroxyde sont égales.

2. Calculer à l'aide d'un tableur la moyenne et l'écart-type de cette série de mesures.

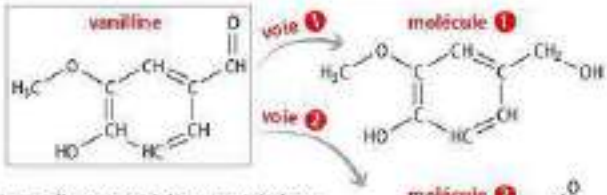
3. Déterminer la concentration en quantité de matière des ions oxonium dans l'eau.

4. Ce résultat est-il en accord avec la valeur du pH de l'eau ?

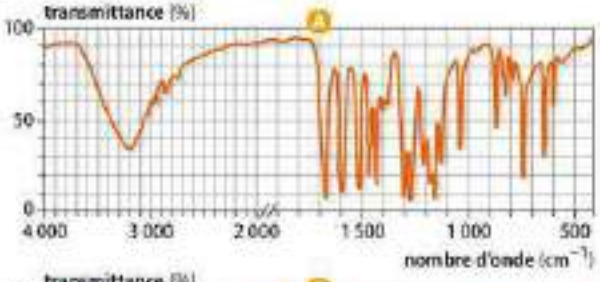
JE VÉRIFIE QUE J'AI...
- utilisé correctement les outils statistiques de la calculatrice ou du tableur ;
- respecté les unités pour le calcul de la concentration.

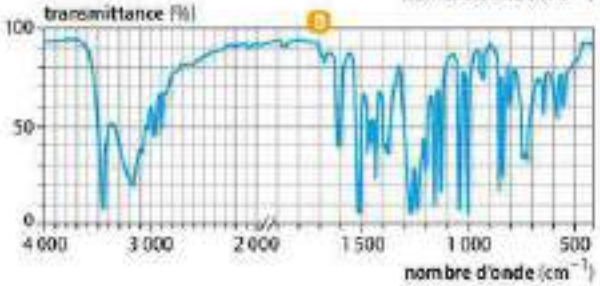
33 La vanille

La gousse de vanille doit essentiellement son parfum et son arome à la vanilline. Plusieurs molécules peuvent être synthétisées à partir de la vanilline, en voici deux :



Lors d'une synthèse, on obtient une espèce chimique inconnue dont on enregistre le spectre infrarouge (1) qui est comparé à celui de la vanilline (2).





Données : *table des bandes IR, en rabat v de couverture.*

1. a. Pour chaque voie de synthèse, nommer le groupe caractéristique se substituant au groupe carbonyle de la vanilline.
b. À quelles familles ces groupes correspondent-ils ?

2. Quelle est l'espèce chimique obtenue lors de cette synthèse ?

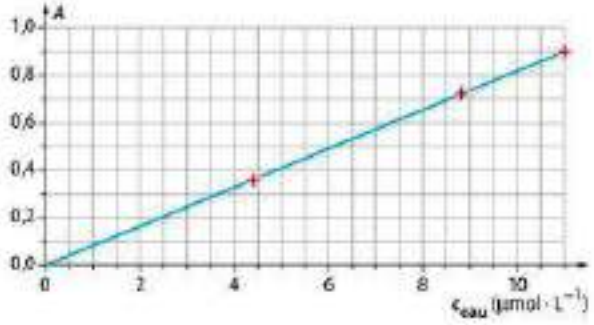
34 « Maladie » des aquariums

DÉMARCHES DIFFÉRENCIÉES

L'apparition de points blancs sur des poissons est un signe de mauvaise santé. L'eau doit alors être traitée avec du vert de malachite. Une fois le traitement terminé, il faut éliminer le vert de malachite afin de ne pas exposer les poissons à cette substance trop longtemps. Cette maladie est apparue dans un grand bassin de 8,0 m de longueur, 3,0 m de largeur et 50 cm de profondeur.

Le premier traitement fini, on mesure l'absorbance de l'eau du bassin avant l'ajout du charbon actif : $A = 0{,}67$.

Données :
- *1 g de charbon actif permet d'éliminer 10 mg de vert de malachite.*
- *Masse molaire du vert de malachite* $M = 329\ g \cdot mol^{-1}$.
- *Courbe d'étalonnage* $A = f(c)$ *du vert de malachite :*



DÉMARCHE EXPERTE

Quelle masse de charbon actif faut-il verser dans le bassin afin d'éliminer le surplus de vert de malachite ?

DÉMARCHE AVANCÉE

1. Déterminer, à partir de la courbe d'étalonnage, la concentration en quantité de matière de vert de malachite de l'eau du bassin.

2. En déduire la masse de vert de malachite restant dans l'eau.

3. Quelle est la masse de charbon actif nécessaire à l'élimination de ce reste de vert de malachite ?

35 Détartrant

Un détartrant pour cafetières se présente sous forme d'un solide blanc : l'acide sulfamique NH_3SO_3, de masse molaire $M = 97{,}0\ g \cdot mol^{-1}$.

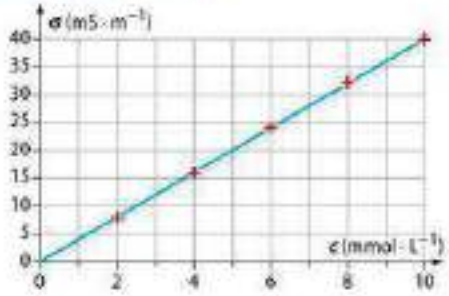
La dissolution de l'acide sulfamique dans l'eau s'écrit :

$$NH_3SO_3 + H_2O \rightarrow NH_2SO_3^-(aq) + H_3O^+(aq)$$

On souhaite vérifier la pureté d'un échantillon acheté dans le commerce en s'appuyant sur un dosage conductimétrique par étalonnage.

On donne ci-après le protocole expérimental suivi.

- *Dissoudre totalement dans de l'eau distillée 1,00 g de poudre détartrante dans une fiole jaugée de 200 mL. La solution obtenue est notée S.*
- *Prélever à l'aide d'une pipette jaugée 10 mL de solution S et la diluer dans une fiole jaugée de 100 mL avec de l'eau distillée. La solution obtenue est notée S_1.*
- *Réaliser une gamme étalon à partir d'une solution-mère d'acide sulfamique de concentration $c = 10$ mmol · L^{-1}.*
- *Mesurer la conductivité de chaque solution de la gamme et tracer la courbe d'étalonnage. Celle-ci est donnée ci-dessous.*



- *Mesurer la conductivité de la solution S_1, on trouve : $\sigma = 15{,}4$ mS · m^{-1}.*

1. Pourquoi la solution obtenue est-elle conductrice d'électricité ?

2. Quelle est la concentration en quantité de matière de la solution S ?

3. Pourquoi cette solution est-elle diluée avant d'effectuer les mesures ?

4. En déduire la masse d'acide sulfamique présent dans 1 g de détartrant commercial.

5. Calculer la proportion en masse d'acide sulfamique dans ce détartrant.

Coups de pouce

- Convertir toutes les unités dans le Système international avant d'effectuer les calculs.
- Tenir compte dans les calculs de la dilution de la solution S pour obtenir S_1.

36 Un peu d'ordre !

Lors de l'inventaire des produits chimiques présents sur son lieu de travail, un laborantin s'aperçoit que les étiquettes de certains flacons se sont décollées. Il découvre trois flacons A, B et C dépourvus d'indications, et trois étiquettes tombées sur l'étagère :



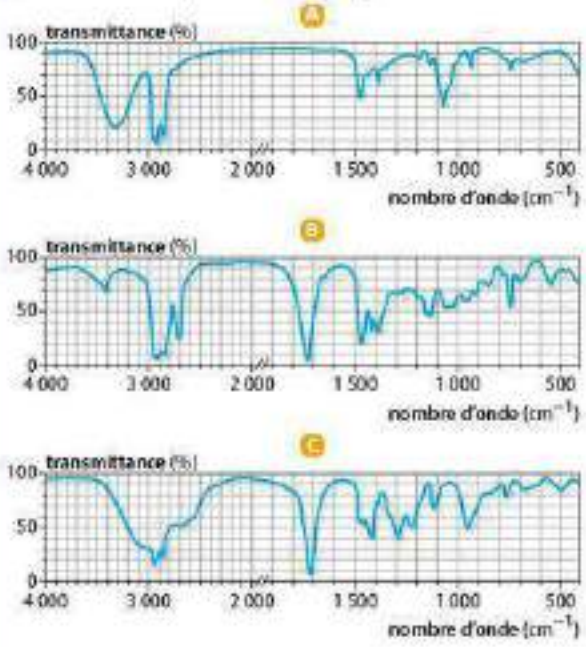
Il décide alors de réaliser les spectres infrarouge A, B et C des trois produits contenus dans les flacons.

Données : *table des bandes IR, en rabat v de couverture.*

1. Montrer par le calcul que la grandeur figurant en abscisse des spectres correspond bien au domaine infrarouge.

2. Écrire les formules semi-développées des molécules désignées sur chacune des étiquettes.

3. Attribuer à chaque flacon son étiquette.



À L'ORAL

37 Spectroscopie UV-visible

Préparer un exposé oral permettant d'expliquer l'animation suivante.



Les mots-clés à utiliser

- faisceau incident
- monochromateur
- étalonnage
- lumière absorbée
- lumière transmise

Ce court exposé devra pouvoir être réalisé sans note écrite.

38 RETOUR SUR LA PAGE D'OUVERTURE



Pour mieux appréhender les différents systèmes chimiques étudiés, les scientifiques disposent de plusieurs méthodes d'analyse s'appuyant sur des principes physiques simples.

Préparer un exposé oral expliquant en quoi ces méthodes sont spécifiques et parfois complémentaires pour obtenir des informations sur la matière.

PRÉPA BAC

Développer ses compétences

39 Dosage de la fluorescéine — RÉSOLUTION DE PROBLÈME

40 min

ANALYSER Proposer une stratégie de résolution

Les propriétés de la fluorescéine sont exploitées dans la recherche de sources de cours d'eau, la détection de fuites et l'utilisation médicale.

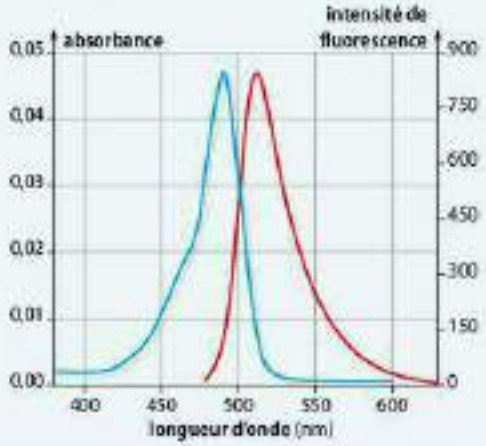
Aujourd'hui, l'étude d'une méduse bioluminescente élargit encore le champ des applications de ces « molécules lumineuses » en biologie.



DOC 1 Spectres d'absorption et d'émission

Pour fluorescer, une molécule doit absorber un maximum de lumière qu'elle restitue ensuite avec une longueur d'onde plus élevée.

Les spectres d'émission et d'absorption ci-dessous de la fluorescéine ont été réalisés au laboratoire à l'aide d'un spectrophotomètre.

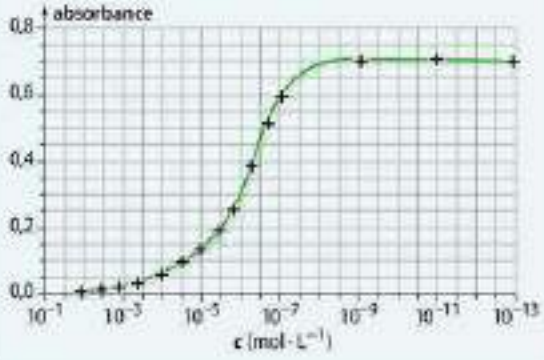


DOC 2 Influence du pH

La fluorescéine existe sous différentes formes dans trois couples acide-base différents.

L'absorbance d'une solution de cette molécule dépend donc fortement du pH. Par ajout de solutions acides ou basiques, il est possible de contrôler la concentration en quantité de matière d'ions oxonium présents dans la solution.

On a mesuré l'absorbance des solutions de fluorescéine pour différentes concentrations c en ions oxonium, voici le graphique obtenu :



DOC 3 Contrôle au laboratoire

Lorsqu'elle est utilisée en solution injectable, la fluorescéine peut impliquer des effets indésirables graves, parfois mortels. Mais il faut que la teneur en fluorescéine soit suffisante pour maintenir de bonnes conditions d'observation. Ainsi, il est nécessaire de contrôler rigoureusement la concentration d'une telle solution.

La concentration en masse optimale c_m vaut 20 mg · mL^{-1}.

Solution	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
Concentration (en µmol · L^{-1})	27,0	20,0	13,0	7,00	3,00
Absorbance	1,5	1,2	0,80	0,45	0,20

À partir d'une solution-mère, une série de dilutions est réalisée. L'absorbance des solutions obtenues S_1 à S_5 est alors mesurée. Les valeurs obtenues sont dans le tableau ci-dessus.

La mesure de l'absorbance d'une solution injectable préalablement diluée 4 000 fois donne $A = 0,85$.

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

Donnée : *masse molaire de la fluorescéine $M = 330$ g · mol^{-1}.*

1. Quelle courbe (doc. 1) correspond au spectre d'absorption de la fluorescéine ?
2. Pour quelles concentrations en quantité de matière d'ions oxonium l'absorbance de la fluorescéine est-elle maximale ?
3. Les mesures réalisées sont-elles en accord avec la loi de Beer-Lambert ?

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

Dans quelles conditions (pH, longueur d'onde) les mesures doivent-elles être effectuées ? La solution injectable étudiée est-elle optimale ?

Il est attendu une prise d'initiatives et une présentation de la démarche suivie même s'il elle n'a pas abouti, et de justifier toute réponse.

40 Solution de lessive

RÉSOLUTION DE PROBLÈME

30 min

AR/RAI Planifier des tâches

Les solutions de lessive ont de nombreuses applications domestiques.
Les ingrédients sont toujours les mêmes : de la lessive et de l'eau !
Dans la réserve de produits d'entretien d'une usine, on trouve une préparation étiquetée « Saint Marc ».

DOC 1 Le paquet de lessive

La lessive Saint Marc est essentiellement constituée de carbonate de sodium hydraté, de formule chimique (Na_2CO_3, 10 H_2O), et de résine de pins pour ses propriétés olfactives.



Quelques conseils d'utilisation de la lessive :

- *Remise à neuf de peintures : 5 g · L⁻¹*
- *Lessivage avant peinture : 50 g · L⁻¹*
- *Nettoyage des murs et du sol : 20 g · L⁻¹*
- *Nettoyage surface grasse : 10 g · L⁻¹*
- *Nettoyage jouets, brosses : 30 g · L⁻¹*

DOC 2 Le carbonate de sodium

Le carbonate de sodium Na_2CO_3 est une espèce chimique utilisée depuis l'Égypte antique comme détergent. On le trouve, sous forme d'une poudre blanche, à l'état naturel, dans de nombreuses réserves géologiques.

L'équation de dissolution d'un solide ionique, de formule A_aB_b (s), constitué de cations A^{b+} et d'anions B^{a-}, s'écrit :

$$A_aB_b\,(s) \rightarrow a\,A^{b+}\,(aq) + b\,B^{a-}\,(aq)$$

Si la concentration en quantité de matière de soluté apporté est c (en mol · L^{-1}), les concentrations ioniques en quantité de matière (en mol · L^{-1}) sont alors :

$$[A^{b+}] = a \cdot c$$
$$[B^{a-}] = b \cdot c$$

Donnée :

- *Masse molaire de Na_2CO_3 : $M = 286\ g \cdot mol^{-1}$.*

DOC 3 Analyse de la préparation

On réalise au laboratoire à 25 °C une série de mesures de la conductivité σ (en mS · m^{-1}) de la préparation trouvée dans la réserve de produits d'entretien, diluée 10 fois. L'étalonnage du conductimètre a préalablement été effectué à l'aide d'une solution étalon de chlorure de potassium.



Les résultats des mesures sont rassemblés dans les tableaux suivants.

n°	1	2	3	4	5	6	7
σ	183	194	180	191	172	168	160

n°	8	9	10	11	12	13	14
σ	180	190	199	180	177	196	170

n°	15	16	17	18	19	20
σ	178	190	195	175	172	160

Données :

- *Conductivités molaires ioniques :*
  $\lambda_{CO_3^{2-}} = 13{,}9\ mS \cdot m^2 \cdot mol^{-1}$; $\lambda_{Na^+} = 5{,}0\ mS \cdot m^2 \cdot mol^{-1}$.

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Écrire l'équation de dissolution du carbonate de calcium dans l'eau.
2. Quelles sont les concentrations ioniques en quantité de matière des ions en solution si la concentration en quantité de matière du carbonate de calcium apporté est c ?
3. Calculer à l'aide d'un tableur ou de la calculatrice la moyenne et l'écart-type de la série de mesures (doc. 3).

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

À quelle fin peut-on utiliser la solution trouvée dans la réserve des produits d'entretien de l'usine ?

Il est attendu une prise d'initiatives et une présentation de la démarche suivie même s'il elle n'a pas abouti, et de justifier toute réponse.

41 Synthèse d'un médicament TÂCHE COMPLEXE

15 min

APP Rechercher et organiser l'information

L'acide benzoïque est un conservateur alimentaire également connu pour ses propriétés antiseptiques. Il peut être aisément synthétisé au laboratoire.

DOC 1 Étapes de la synthèse

La synthèse a lieu en deux étapes.

Dans un premier temps, des ions benzoate $C_6H_5CO_2^-$ sont synthétisés par oxydation de l'alcool benzylique $C_6H_5CH_2OH$ par les ions MnO_4^- en milieu basique selon la réaction d'équation :

$3\,C_6H_5CH_2OH\,(aq) + 4\,MnO_4^-\,(aq) \rightarrow$

$3\,C_6H_5CO_2^-\,(aq) + 4\,MnO_2\,(s) + 4\,H_2O\,(\ell) + OH^-\,(aq)$

L'acide benzoïque est ensuite obtenu par une réaction acide-base mettant en jeu les ions benzoate.

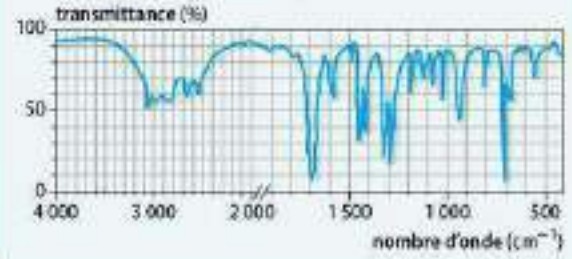
Afin de vérifier la qualité de l'expérimentation, on réalise le spectre infrarouge du produit brut obtenu en fin de synthèse.

DOC 2 Spectres infrarouge

Spectre IR de l'alcool benzylique



Spectre IR du produit brut



LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

Quelles conclusions peut-on tirer quant à la qualité de la synthèse ?

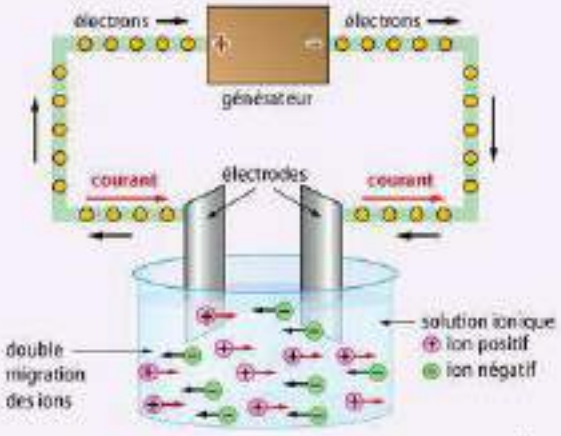
Il est attendu une prise d'initiatives et une présentation de la démarche suivie même s'il elle n'a pas abouti, et de justifier toute réponse.

VERS LE SUP'

42 Mouvement des ions

Un électrolyte est une solution permettant le passage du courant par une conductivité de type ionique.

L'étude expérimentale se fait à l'aide de deux plaques de platine planes et parallèles constituant les électrodes. Il se crée alors entre les électrodes un champ électrique $\vec{E}$ qui dépend de la tension à leurs bornes et de la distance les séparant.



Chaque ion, soumis à l'action du champ électrique $\vec{E}$, est mis en mouvement et atteint une vitesse limite définie par $\vec{v} = \mu \cdot \vec{E}$ où μ est la mobilité d'un ion, qui est fonction de sa taille et de la température.

La mobilité est positive pour les cations et négative pour les anions qui se déplacent en sens inverse.

Tous les ions présents en solution contribuent, par leur mouvement, au passage du courant dans le même sens.

La conductivité molaire ionique λ_i d'un ion est le facteur de proportionnalité entre sa conductivité σ_i et sa concentration c_i en quantité de matière.

À ce mouvement se superpose l'agitation thermique, c'est-à-dire le mouvement incessant dont sont animés les atomes, molécules ou ions qui constituent la matière. L'agitation thermique est d'autant plus énergétique que la température est élevée car elle est directement liée à l'énergie cinétique microscopique des particules.

Donnée : $\lambda_i = \dfrac{\sigma_i}{c_i} = \mu_i \cdot z_i \cdot F$.

z_i est la charge de l'ion i et F une constante égale à la charge d'une mole d'électrons.

1. a. Quelle est l'influence d'une augmentation de la température sur la mobilité d'un ion ?
b. Comment sa conductivité molaire ionique varie-t-elle ?

2. Comment expliquer que « tous les ions contribuent au passage du courant dans le même sens » ?

3. La charge d'un ion joue-t-elle un rôle dans la conductivité de la solution ?

4. a. Résumer les différents facteurs influençant la valeur de la conductivité molaire ionique
b. Donner un sens à cette grandeur.

GESTE ECE n° 3 — Flash PAGE — vidéo

Un antalgique pédiatrique

TABLEUR-GRAPHEUR

Contexte

Le paracétamol est une molécule bien connue pour ses effets contre la douleur. Il existe de nombreux conditionnements suivant la voie d'administration et la rapidité des effets attendue.

Pour les enfants, afin de rendre le médicament plus agréable, il se présente sous forme de suspension buvable contenant des excipients comme des colorants et des arômes.

On s'intéresse ici à la présence d'un colorant : le rouge azorubine E122.



Document mis à disposition

DOC 1 **Un colorant à risque !**

En 2015, l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) a publié une réévaluation du risque associé à l'exposition au colorant rouge azorubine E122.

La valeur aujourd'hui utilisée pour la dose journalière admissible de ce colorant est de 4 mg/kg.

Les spectres d'absorbance UV-visible du rouge azorubine et du paracétamol sont présentés ci-contre.

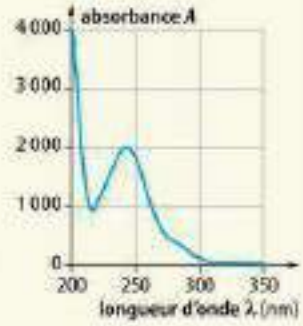
Donnée :

• Masse molaire de l'E122 M = 502,2 g · mol⁻¹.

Spectre UV-visible du colorant E122



Spectre UV-visible du paracétamol



Matériel mis à disposition

- Un ordinateur muni d'un tableur-grapheur
- Un spectrophotomètre avec ses cuves
- Une gamme étalon de solutions aqueuses S en colorant E122 aux concentrations c présentées dans le tableau ci-contre.
- Une seringue de médicament de volume 8,13 mL correspondant à une prise pour un enfant de 13 kg

S	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
c (en µmol · L⁻¹)	0	10	20	30	40	50

Travail à effectuer

1. (ANA) **Proposition de protocole expérimental** *(15 min conseillées)*

■ À partir du document et du matériel disponible, proposer un protocole expérimental permettant de déterminer la concentration en quantité de matière c du rouge azorubine contenu dans la seringue d'administration orale. Justifier le choix du réglage des appareils de mesure utilisés.

Être en mesure de présenter le protocole

2. (RÉA) **Mise en œuvre du protocole expérimental proposé** *(30 min conseillées)*

1. Mettre en œuvre le protocole et effectuer l'acquisition d'une courbe à l'aide du tableur-grapheur.
2. Déterminer la concentration en quantité de matière c du rouge azorubine contenu dans la seringue.

Être en mesure de présenter l'acquisition informatisée

3. (VAL) **Exploitation du résultat obtenu** *(15 min conseillées)*

1. La concentration en quantité de matière c du rouge azorubine déterminée précédemment présente-t-elle un risque au regard des préconisations de l'EFSA ?
2. Identifier les principales sources d'incertitude de ce résultat.

Défaire le montage et ranger la paillasse.

PISTE POUR LE GRAND ORAL PRÉPA BAC

Pour se préparer à l'Oral
➥ Livret LES CLÉS DU BAC
(en début de manuel)

UNE QUESTION

Comment optimiser une culture hors sol ? SVT

Enjeu de la question

Il est aujourd'hui possible de cultiver des fruits et des légumes avec un faible impact sur l'environnement. En effet, les apports d'eau, d'énergie et de nutriments nécessaires à la croissance des plantes peuvent être minimisés en culture hydroponique. Pour cela, la qualité de la soupe nutritive doit être contrôlée en utilisant des méthodes physiques d'analyse.

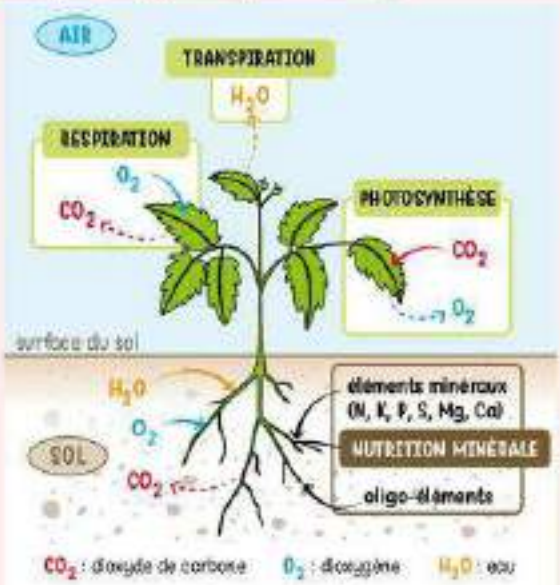
Proposition de plan de présentation

1. Les espèces chimiques indispensables aux plantes
2. Contrôle de l'acidité : mesure du pH
3. Dosage des éléments essentiels à la croissance : mesure de la conductivité
4. Dosage spectrophotométrique des oligoéléments
5. Conclusion : le contrôle du substrat utilisé permet d'optimiser les apports extérieurs

Les mots-clés

pH-mètre › conductivité d'une solution › spectrophotomètre UV-visible › absorbance › concentration en quantité de matière

Exemple de support de présentation



La croissance des végétaux

QUESTIONS D'APPROFONDISSEMENT POSSIBLES



UN EXEMPLE DE PROJET PROFESSIONNEL

Spécialiste de sciences et de nature, l'**ingénieur agronome** met son savoir au service de la productivité agricole et du respect de l'environnement. Il est capable de mener des analyses pour optimiser les productions (élevages, céréales, maraîchages). Celles-ci portent, par exemple, sur la nature des sols afin d'identifier quelle culture y serait la plus appropriée.

Son expertise lui permet d'apporter des préconisations aussi bien techniques qu'économiques afin de développer des productions durables et compétitives.

L'ingénieur agronome peut aussi contribuer à la recherche et au développement de nouveaux matériels agricoles ou à la production dans l'industrie agroalimentaire.



Après le bac : *Bac + 5, diplôme d'ingénieur (accessible sur concours après un Bac + 2 type classes prépas, ou après un quatrième semestre de licence ou BTS /DUT).*

Autres métiers : *ingénieur(e) agroalimentaire, vétérinaire, technicien(ne) qualité de l'eau, chargé(e) d'hygiène, de sécurité et d'environnement.*

Avant d'aborder le chapitre EN AUTONOMIE

LES ACQUIS INDISPENSABLES

Seconde — 1re Enseignement de spécialité

La **masse volumique** ρ d'une espèce chimique est sa masse par unité de volume. Elle permet d'identifier l'espèce chimique.

masse volumique (en kg · m⁻³) : $\rho = \frac{m}{V}$ — m : masse (en kg) ; V : volume (en m³)

La **concentration c en quantité de matière** d'une espèce en solution est la quantité de matière de soluté, dissoute dans un litre de solution.



Pour former la solution, le soluté a été dissous dans le solvant.

concentration (en mol · L⁻¹) : $c = \frac{n}{V}$ — n : quantité de matière (en mol) ; V : volume de la solution (en L)

Titrer une espèce chimique en solution consiste à déterminer sa quantité de matière ou sa concentration en utilisant une réaction chimique.

Une transformation chimique cesse dès qu'au moins un des réactifs est totalement consommé : c'est le **réactif limitant**.

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

Pour chaque situation, rédiger une réponse qui explique en quelques lignes le raisonnement.

SITUATION 1

L'eau est le solvant le plus utilisé en chimie.

Quelle est la valeur de sa masse volumique la plus couramment utilisée ?

La convertir en kg · m⁻³ et en g · cm⁻³.

SITUATION 2

On veut réaliser un titrage.

Schématiser et légender le dispositif expérimental qu'il faut mettre en place.

SITUATION 3

Voici l'équation de la réaction modélisant la transformation entre les ions cuivre et les ions argent :

$2\,Ag^+(aq) + Cu(s) \rightarrow 2\,Ag(s) + Cu^{2+}(aq)$

Si on fait réagir 1,0 mol d'ions cuivre avec 1,0 mol d'ions argent, quel est le réactif limitant ?



État final de la transformation



CHAPITRE

3

CHIMIE

chimiques d'analyse



Comment mettre en œuvre une analyse d'eau pour déterminer sa concentration en un ou plusieurs de ses ions ?

→ EXERCICE 05

NOTIONS ET CONTENUS

- Titre massique et densité d'une solution.
- Titrage avec suivi pH-métrique.
- Titrage avec suivi conductimétrique.

CAPACITÉS EXPÉRIMENTALES

- Réaliser une solution de concentration donnée en soluté apporté à partir d'une solution de titre massique et de densité fournis. → Activité 1
- Mettre en œuvre le suivi pH-métrique d'un titrage ayant pour support une réaction acide-base. → Activité 2
- Mettre en œuvre le suivi conductimétrique d'un titrage. → Activité 3 → Pour préparer l'ECE

TP

COMPÉTENCES :
ANA/RAI Justifier un protocole expérimental
RÉA Mettre en œuvre les étapes d'une démarche en respectant les règles de sécurité

Dilution d'une solution

Comment préparer pour les TP de chimie une solution diluée à partir d'une solution commerciale concentrée, stockée dans l'armoire ventilée du laboratoire ?





DOC 1 L'acide chlorhydrique

On dispose au laboratoire d'une solution d'acide chlorhydrique concentré de titre massique $w = 34\ \%$ (voir doc. 2).
La densité (voir doc. 3) de la solution, inscrite sur le flacon, est $d = 1{,}17$.

Données :
- *Masse molaire M du soluté dans la solution commerciale :* $M(HCl) = 36{,}5\ g \cdot mol^{-1}$.
- *Masse volumique ρ de l'eau :* $\rho_{eau} = 1{,}00 \times 10^3\ g \cdot L^{-1}$.

DOC 2 Titre massique

Le titre massique w d'une solution est le quotient de la masse de soluté contenu dans un échantillon de solution par la masse de cet échantillon. Il s'exprime en pourcentage et sans unité.

titre massique (%) → $w = \dfrac{m_{soluté}}{m_{solution}} \times 100$

$m_{soluté}$: masse de soluté (en g)
$m_{solution}$: masse de solution (en g)

DOC 3 Densité

La densité d d'une solution est le quotient de sa masse volumique ρ par celle de l'eau ρ_{eau}, les deux masses volumiques étant exprimées dans la même unité.

densité (sans unité) → $d = \dfrac{\rho}{\rho_{eau}}$

ρ : masse volumique (par exemple, en $kg \cdot m^{-3}$)
ρ_{eau} : masse volumique de l'eau (par exemple, en $kg \cdot m^{-3}$)

GESTE EXPÉRIMENTAL

Une dilution est réalisée dans une fiole jaugée. De l'eau distillée est ajoutée à un volume de solution-mère, prélevé avec une pipette jaugée.



EXPLOITATION ET ANALYSE

1 Lister le matériel nécessaire à la réalisation d'une dilution.

2 a. Calculer la masse d'un litre de solution commerciale prise dans l'armoire du laboratoire.
b. Quelle masse de soluté contient-elle ?
c. Déterminer sa concentration en quantité de matière de soluté.

3 Quelles consignes de sécurité faut-il respecter pour manipuler la solution commerciale ?

EXPÉRIENCE ET SYNTHÈSE

4 Préparer une solution de concentration en quantité de matière $c_{diluée} = 2 \times 10^{-1}\ mol \cdot L^{-1}$ à partir de la solution commerciale et comparer avec la réponse donnée à la question 1.

Je réussis si...

- **Je connais le titre massique d'une solution.**
- **Je sais différencier la masse volumique de la densité.**
- **Je suis capable d'adapter un protocole expérimental.**

TP

COMPÉTENCES :
REA Mettre en œuvre un protocole expérimental
VAL Comparer à une valeur de référence

Titrage suivi par pH-métrie

Comment déterminer la teneur en acide lactique d'un détartrant commercial utilisé pour éliminer le tartre d'une cafetière par exemple ?

GESTE ECE n° 2

Flash PAGE vidéo

DOC 1 Dépôt de tartre



Le tartre, qui s'y dépose peu à peu, fait figure d'ennemi numéro un pour les cafetières dites italiennes. Il peut en effet altérer le bon fonctionnement de ces machines, voire modifier le goût du café, un sacrilège pour les amateurs de café ! Il est donc indispensable de détartrer régulièrement les cafetières.



DOC 2 Un détartrant commercial

Il est préférable d'utiliser un détartrant à base d'acide lactique, noté AH, car cet acide est biodégradable.

Le détartrant commercial liquide conditionné dans un petit flacon contient de l'acide lactique à 55 % en masse.

L'étiquette indique qu'il faut verser le contenu du flacon dans le réservoir de l'appareil à détartrer et ajouter de l'eau. On prépare ainsi une solution aqueuse d'acide lactique diluée.



Données :

- *Masse molaire M de l'acide lactique : $M(AH) = 90\ g \cdot mol^{-1}$.*
- *Masse volumique ρ du détartrant : $\rho = 1{,}1\ kg \cdot L^{-1}$.*

DOC 3 Approche de la quantité de matière par Python

Un programme en langage Python permet de simuler l'évolution des quantités de matière du couple acide-base AH (aq)/A^- (aq) auquel appartient l'acide lactique, en fonction du volume de solution titrante versé.

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
C_B=0.2  #concentration (mol/L) de la solution titrante (soude)
V_A=5    #volume initial (mL) de la solution titrée (acide
         lactique)
V_E=15   #volume (mL) mesuré à l'équivalence
C_A=C_B*V_E/V_A
n_A=C_B*V_E*1e-3
V_B1=np.linspace(0,V_E,V_E*10+1)
n_a1=(C_A*V_A-C_B*V_B1)*1e-3
n_b1=C_B*V_B1*1e-3
n_B1=0*V_B1
V_B2=np.linspace(V_E,V_E*1.5,V_E*10+1)
n_a2=0*V_B2
n_b2=(0*V_B2+C_B*V_E)*1e-3
n_B2=C_B*(V_B2-V_E)*1e-3
plt.plot(V_B1,n_a1,color="blue",label="AH")
plt.plot(V_B1,n_b1,color="green",label="A-")
plt.plot(V_B1,n_B1,color="red",label="HO-")
plt.plot(V_B2,n_a2,color="blue")
plt.plot(V_B2,n_b2,color="green")
plt.plot(V_B2,n_B2,color="red")
plt.title("Evolution des quantités de matière des espèces en
  fonction du volume de solution titrante versée \nTitrage de l'
  acide lactique par la soude")
plt.legend(loc="upper right")
plt.xlabel("Volume de la solution titrante (en mL)")
plt.ylabel("Quantités de matière des espèces en solution (en mol)")
plt.grid()
plt.show()
```

EXPÉRIENCE ET EXPLOITATION

On veut titrer avec suivi pH-métrique un volume $V_A = 5{,}0$ mL de solution commerciale de détartrant à base d'acide lactique (AH), diluée 10 fois, par une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium (Na^+ (aq), HO^- (aq)) de concentration en quantité de matière $c_B = 0{,}20\ mol \cdot L^{-1}$.

1 Après avoir identifié les couples mis en jeu, écrire l'équation acide-base, support du titrage.

2 Pourquoi faut-il diluer la solution commerciale avant le titrage ? Comment peut-on procéder ?

3 Mettre en œuvre le titrage et déterminer la concentration en quantité de matière d'acide lactique dans la solution commerciale en précisant la démarche suivie.

4 Exécuter le programme fourni (doc. 3) et commenter les courbes observées.

SYNTHÈSE

5 Le résultat du titrage est-il cohérent avec l'indication du pourcentage massique (doc. 2) ?

Je réussis si...

- **Je suis capable de choisir la verrerie appropriée pour effectuer une dilution.**
- **Je sais réaliser un titrage suivi par pH-métrie.**
- **Je peux exploiter un programme en langage Python.**

COMPÉTENCES :
APP Rechercher et organiser l'information
ANA RAI Proposer une stratégie de résolution

Titrage par conductimétrie



LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

Les déboucheurs chimiques sont très utilisés par les consommateurs pour résoudre les problèmes de canalisations. Il s'agit en général de solutions plus ou moins concentrées de soude, qui peuvent provoquer des brûlures.

Comment vérifier la teneur en hydroxyde de sodium dans un déboucheur préalablement dilué 10 fois en procédant à un titrage ?

COUP DE POUCE → p. 503

DOC 1 Un déboucheur de canalisations

Déboucheur liquide.
Vloeibare ontstopper *met bijtende soda.
Abflussfrei flüssig.
INGREDIENTS: www.info-detergent.com

Précautions d'emploi : Danger : Contient SODIUM HYDROXYDE. Peut être corrosif pour les métaux. Provoque de graves brûlures de la peau et de graves lésions des yeux. ors de portée des enfants. Conserver uniquement dans age d'origine. Éliminer le contenu/récipient dans un centre de des déchets dangereux ou spéciaux. Absorber toute substance e pour éviter qu'elle attaque les matériaux environnants. Ne pas

Un déboucheur du commerce possède un pourcentage massique en hydroxyde de sodium de 10 %, c'est-à-dire que 100 g de déboucheur contiennent 10 g d'hydroxyde de sodium.

La densité de cette solution est $d = 1,23$.

Donnée :
• La masse molaire du soluté est $M(NaOH) = 40\ g \cdot mol^{-1}$.

GESTE ECE n° 1

Flash PAGE vidéo

DOC 2 Le conductimètre

Température (en °C)	Concentration de la solution étalon (en mol · L⁻¹) : $c = 1,0 \times 10^{-2}$ — Conductivité σ (en µS · cm⁻¹)	Concentration de la solution étalon (en mol · L⁻¹) : $c = 1,0 \times 10^{-1}$ — Conductivité σ (en mS · cm⁻¹)
20	1 279	11,70
21	1 305	11,96
22	1 331	12,22
23	1 359	12,47
24	1 387	12,73
25	1 412	12,97

Les conductimètres du commerce mesurent directement la **conductivité** σ d'une solution, exprimée en siemens par mètre ($S \cdot m^{-1}$). Ils se composent d'une sonde conductimétrique et d'un boîtier de mesure.

Pour effectuer une mesure, la sonde devant être bien immergée, on ajoute 100 mL d'eau distillée à une **prise d'essai** de 10 mL de cette solution.

Un étalonnage doit être réalisé au préalable à l'aide d'une solution aqueuse étalon de chlorure de potassium (K^+ (aq), Cl^- (aq)), dont la conductivité est connue, le tableau ci-contre donne les valeurs de σ en fonction de la température pour deux concentrations différentes.

On effectue les mesures de conductivité de la solution la plus diluée à la plus concentrée.



VOCABULAIRE

- **Conductivité** : grandeur proportionnelle à la conductance G d'une solution.
  La conductance, exprimée en siemens (S), traduit la capacité d'une solution à conduire le courant électrique
- **Prise d'essai** : volume précis de solution titrée, prélevé pour réaliser le titrage.

Je réussis si...

- **Je suis capable de mettre en œuvre le suivi conductimétrique d'un titrage.**
- **Je sais exploiter un titrage pour déterminer une concentration.**

1 Caractéristiques d'une solution

Titre massique

Le **titre massique** w d'une solution est le quotient de la masse de soluté contenu dans un échantillon de solution par la masse de cet échantillon. Il s'exprime en pourcentage et sans unité.

titre massique (%) → $w = \dfrac{m_{soluté}}{m_{solution}} \times 100$

$m_{soluté}$: masse de soluté (en g)

$m_{solution}$: masse de solution (en g)

EXEMPLE

Une solution aqueuse commerciale de chlorure d'hydrogène, appelé aussi acide chlorhydrique (FIG. 1), a pour titre massique $w = 34\ \%$.



FIG. 1 Étiquette d'une solution commerciale d'acide chlorhydrique.

Densité

La **masse volumique**, notion rencontrée en classe de seconde, caractérise une solution.

La **masse volumique** ρ d'une solution est sa masse par unité de volume.

masse volumique (en $kg \cdot m^{-3}$) → $\rho = \dfrac{m}{V}$

m : masse de la solution (en kg)

V : volume de la solution (en m^3)

La **densité** d'une solution permet de comparer sa masse volumique à celle de l'eau.

La **densité** d d'une solution est le quotient de sa masse volumique ρ par celle de l'eau ρ_{eau}, les deux masses volumiques étant exprimées dans la même unité.

densité (sans unité) → $d = \dfrac{\rho}{\rho_{eau}}$

ρ : masse volumique de la solution (par exemple, en $kg \cdot m^{-3}$)

ρ_{eau} : masse volumique de l'eau (par exemple, en $kg \cdot m^{-3}$)

EXEMPLE

La masse volumique de l'eau est $\rho_{eau} = 1{,}00 \times 10^3\ g \cdot L^{-1}$. Si celle d'une solution aqueuse de chlorure d'hydrogène est $\rho = 1{,}18 \times 10^3\ g \cdot L^{-1}$, sa densité est alors $d = 1{,}18$.

Préparation d'une solution diluée

On considère une solution de volume V et dont la densité est d et le titre massique w. La masse de soluté dans ce volume V est déduite de la relation

$w = \dfrac{m_{soluté}}{m_{solution}}$, donc $m_{soluté} = m_{solution} \cdot w$.

Comme $\rho = \dfrac{m}{V}$ alors $m = \rho \cdot V$, d'où $m_{soluté} = \rho \cdot V \cdot w$.

À partir de la relation $d = \dfrac{\rho}{\rho_{eau}}$, on a : $\rho = \rho_{eau} \cdot d$.

Donc : $\boldsymbol{m_{soluté} = \rho_{eau} \cdot d \cdot V \cdot w}$

La concentration c en quantité de matière de soluté dans cette solution est $c = \dfrac{n_{soluté}}{V}$. Comme $n_{soluté} = \dfrac{m_{soluté}}{M}$ (M étant la masse molaire du soluté) alors : $c = \dfrac{m_{soluté}}{M \cdot V} = \dfrac{\rho_{eau} \cdot d \cdot V \cdot w}{M \cdot V}$ soit $\boldsymbol{c = \dfrac{\rho_{eau} \cdot d \cdot w}{M}}$.

■ Pour préparer une solution de concentration en quantité de matière donnée, on procède alors à une **dilution** (FIG. 2). Lors de cette opération, la quantité de matière de soluté n'est pas modifiée (FICHE PRATIQUE ➥ p. 571).

EXEMPLE

Une solution commerciale d'acide chlorhydrique (la solution-mère) a une densité $d = 1{,}18$ et un titre massique $w = 37\ \%$, la masse molaire du soluté étant $M(HCl) = 36{,}5\ g \cdot mol^{-1}$. Sachant que $\rho_{eau} = 1{,}00 \times 10^3\ g \cdot L^{-1}$, sa concentration c en quantité de matière de soluté est :

$$c = \frac{\rho_{eau} \cdot d \cdot w}{M} = \frac{1\,000 \times 1{,}18 \times 0{,}37}{36{,}5} \text{ soit } c = 12\ mol \cdot L^{-1}.$$

On sait que la quantité de matière de soluté est conservée au cours d'une dilution, donc $n = n_{dilué}$ soit $c \cdot V = c_{dilué} \cdot V_{dilué}$.

Pour préparer par dilution à partir de la solution mère un volume $V_{dilué} = 500\ mL$ d'une solution de concentration $c_{dilué} = 0{,}1\ mol \cdot L^{-1}$, on doit en prélever un volume V :

$$V = \frac{c_{dilué} \cdot V_{dilué}}{c} = \frac{0{,}1 \times 500 \times 10^{-3}}{12} \text{ soit } V = 4 \times 10^{-3}\ L = 4\ mL.$$

Comme il n'existe pas de pipette jaugée de volume 4 mL, on utilisera une burette graduée.



FIG. 2 Mise en œuvre d'une dilution à l'aide d'une pipette et d'une fiole jaugées.

2 Titrage

Qu'est-ce qu'un titrage ?

Un **titrage** est une méthode de dosage qui consiste à déterminer la quantité de matière (ou la concentration ou la masse) d'une espèce chimique à l'aide d'une transformation chimique.

■ Pour qu'une **transformation chimique** puisse servir de support à un titrage, elle doit être **totale**, **rapide** et **unique**.

Unique signifie que l'espèce chimique titrante doit réagir uniquement avec l'espèce chimique à titrer.

■ Le titrage nécessite :
– une **solution titrante** dont la concentration en quantité de matière est connue ;
– une **solution titrée**.

■ On met en œuvre un titrage (FIG. 3) en versant à l'aide d'une burette graduée un volume de solution titrante dans un volume précis (prélevé à la pipette jaugée) de solution titrée contenu dans un erlenmeyer (ou un bécher), ce volume précis est la **prise d'essai** (FICHE PRATIQUE ➥ p. 574).

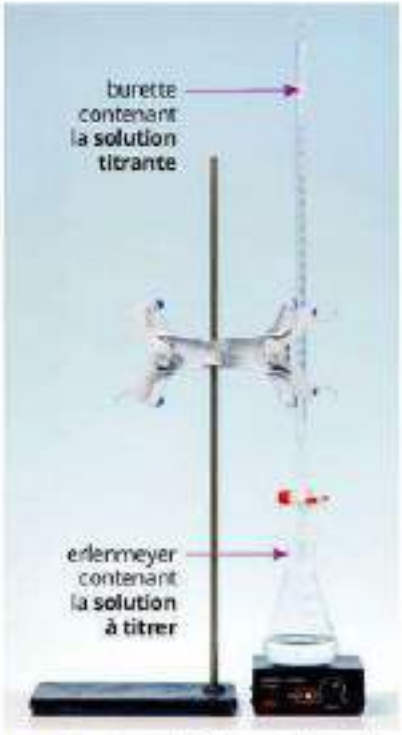


FIG. 3 Le dispositif mis en jeu lors d'un titrage se compose d'une burette graduée, d'un erlenmeyer et d'un agitateur magnétique.

Équivalence d'un titrage

■ À chaque ajout, l'espèce chimique que contient la solution titrante réagit totalement avec celle contenue dans la solution titrée. Cette dernière s'épuise au fur et à mesure des ajouts.

L'**équivalence du titrage** correspond à l'état du système chimique pour lequel les espèces chimiques, titrante et titrée, ont été mélangées dans les **proportions stœchiométriques** ; elles sont donc **totalement consommées.**

■ L'équivalence correspond aussi à l'état du système chimique pour lequel il y a **changement de réactif limitant**.

Avant l'équivalence, le réactif titrant est limitant.

Après l'équivalence il ne l'est plus ; ce réactif titrant, qui continue d'être ajouté, se trouve en excès.

VOCABULAIRE

▸ **Prise d'essai** : volume précis de solution titrée, prélevé pour réaliser un titrage.

EXEMPLE

Lors du titrage de l'acide chlorhydrique par une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium, ou soude, la transformation est modélisée par la réaction d'équation : H_3O^+ (aq) + HO^- (aq) → $2H_2O$ (ℓ)

Les ions H_3O^+ (aq) sont progressivement consommés par les ions HO^- (aq) lors de l'ajout de soude. Avant l'équivalence, les ions HO^- (aq) sont le réactif limitant. Après l'équivalence, on continue de verser de la soude et les ions HO^- (aq) se trouvent alors en excès.

Le **volume équivalent**, noté V_E, est le volume de solution titrante versé pour atteindre l'équivalence.
L'**avancement à l'équivalence** de la réaction, qui modélise la transformation support du titrage, est noté x_E.

Évolution des quantités de matière

La quantité de matière de l'espèce titrée diminue jusqu'à l'équivalence où elle s'annule et celle de l'espèce titrante reste nulle jusqu'à l'équivalence, puis elle augmente (FIG. 4).
À l'équivalence, les quantités de matière des espèces titrée et titrante sont toutes les deux nulles.

EXEMPLE

On peut utiliser un programme en langage Python pour visualiser l'évolution des quantités de matière des espèces lors du titrage d'une solution aqueuse d'acide éthanoïque par la soude dont l'équation de réaction est (FIG. 4) :

$$CH_3CO_2H\ (aq) + HO^-\ (aq) \rightarrow CH_3CO_2^-\ (aq) + H_2O\ (\ell)$$

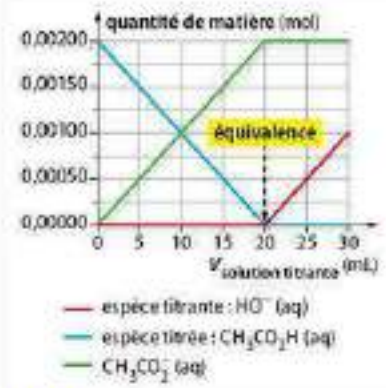


FIG. 4 Évolution des quantités de matière des espèces chimiques lors du dosage de l'acide éthanoïque par la soude.

BONUS
Titrage pH-métrique



Cette animation décrit le protocole d'un titrage pH-métrique et montre le tracé de la courbe de suivi.

3 Titrage avec suivi pH-métrique

Courbe de titrage

Quand le titrage a pour support une transformation chimique de type acide-base, on peut mesurer le **pH** après chaque ajout de solution titrante dans la solution titrée (FIG. 5) (FICHE PRATIQUE ➡ p. 572).

La courbe obtenue alors est **croissante** lors du titrage d'un acide par une base et **décroissante** si on titre une base par un acide.

Équivalence

Sur la courbe d'évolution du pH en fonction du volume de solution titrante versé, l'équivalence correspond au volume de solution titrante versé pour lequel on observe **un saut important de pH** (FIG. 5).

L'**équivalence** est repérée par la **méthode des tangentes** ou par la **méthode de la dérivée** (FICHE PRATIQUE ➡ p. 574).

POINT MÉTHODE

Méthode des tangentes : on trace de part et d'autre de la zone de saut de pH deux tangentes à la courbe parallèles, puis une droite qui leur est parallèle et équidistante. Cette droite coupe la courbe de titrage au point d'abscisse V_E, le volume équivalent (FIG. 5A).

Méthode de la dérivée : à l'aide d'un logiciel, on trace la dérivée de la courbe pH = $f(V)$.
L'abscisse de l'extrémum de cette courbe est le volume équivalent V_E. L'*extrémum* ici est un *maximum* dans le cas du titrage d'un acide par une base (FIG. 5B). Il peut être un *minimum* lors du titrage d'une base par un acide.

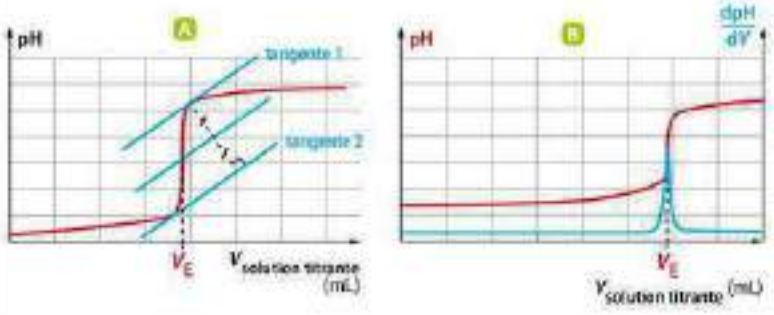


FIG. 5 Détermination du volume équivalent V_E sur la courbe de titrage d'un acide par une base par la méthode des tangentes A ou de la dérivée B.

Exploitation du titrage

La connaissance du volume équivalent permet de calculer la quantité de matière, la concentration ou la masse d'une espèce chimique titrée.

À l'équivalence, les quantités de matière de l'acide A et de la base B (espèces titrante et titrée) sont égales : $n_A = n_B$ soit $c_A \cdot V_A = c_B \cdot V_B$.

EXEMPLE

Lors du titrage de $V_A = 10$ mL de solution aqueuse d'acide éthanoïque de concentration en quantité de matière c_A inconnue par la soude de concentration $c_B = 1{,}0 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}, on a versé à l'équivalence $V_E = 20$ mL de soude.

Équation de la réaction :		CH_3CO_2H (aq) + HO^- (aq) → $CH_3CO_2^-$ (aq) + H_2O (ℓ)			
État du système	**Avancement x** (en mol)	**Quantités de matière présentes dans le système** (en mol)			
Initial	$x = 0$	$n_A = c_A \cdot V_A$	$n_B = c_B \cdot V_B$	0	excès
si $V_B < V_E$	x	$c_A \cdot V_A - x$	$c_B \cdot V_B - x = 0$	x	
si $V_B = V_E$	$x = x_E$	$c_A \cdot V_A - x_E = 0$	$c_B \cdot V_E - x_E = 0$	x_E	

À l'équivalence, les quantités de matière des réactifs sont toutes les deux nulles, d'où la relation $c_A \cdot V_A = c_B \cdot V_E$, on en déduit alors :

- $n_A = c_B \cdot V_E = 1{,}0 \times 10^{-2} \times 20 \times 10^{-3}$ soit $n_A = 2{,}0 \times 10^{-4}$ mol ;
- $c_A = \dfrac{n_A}{V_A} = \dfrac{c_B \cdot V_E}{V_A} = \dfrac{1{,}0 \times 10^{-2} \times 20 \times 10^{-3}}{10 \times 10^{-3}}$ soit $c_A = 2{,}0 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.

4 Titrage avec suivi conductimétrique

Courbe de titrage

Quand au moins une des espèces chimiques mises en jeu lors de la transformation, support du titrage, est ionique, on peut mesurer la **conductivité σ** (exprimée en siemens par mètre : S · m^{-1}) de la solution au fur et à mesure de l'addition du **réactif titrant** (FIG. 6) (FICHE PRATIQUE ➡ p. 573).

Équivalence

Lorsque la dilution (due à l'ajout de la solution titrante) est négligeable, les points expérimentaux se répartissent selon deux droites.

L'**équivalence** est repérée par le changement de pente de la courbe de titrage. Le volume équivalent V_E correspond à l'abscisse du point d'intersection des deux droites de la courbe de titrage (FIG. 6) (FICHE PRATIQUE ➡ p. 574).

Les **conductivités molaires ioniques** (exprimées en S · m^2 · mol^{-1}) et les concentrations des ions en solution expliquent l'évolution de la pente de la courbe.

EXEMPLE

Au début du titrage de l'acide chlorhydrique par la soude, les ions présents en solution sont H_3O^+ et Cl^-. Au fur et à mesure que l'on verse de la solution titrante, des ions Na^+ et HO^- sont ajoutés à la solution. Les ions HO^- versés réagissent avec les ions H_3O^+ présents dans la solution pour former de l'eau, non conductrice. Tout se passe comme si les ions H_3O^+ initialement présents étaient remplacés par des ions Na^+ dont la conductivité molaire ionique est plus faible (FIG. 7) : la conductivité de la solution diminue (FIG. 6).

Après l'équivalence, on continue de verser des ions qui ne réagissent pas, donc la conductivité de la solution augmente (FIG. 6).

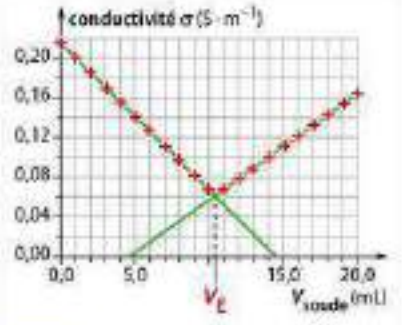


FIG. 6 Courbe de suivi du titrage conductimétrique d'acide chlorhydrique par la soude.

Ion	Conductivité molaire ionique λ (en S · m^2 · mol^{-1})
H_3O^+	$35{,}0 \times 10^{-3}$
Na^+	$5{,}0 \times 10^{-3}$
K^+	$7{,}4 \times 10^{-3}$
HO^-	$19{,}8 \times 10^{-3}$
Cl^-	$7{,}6 \times 10^{-3}$
Br^-	$7{,}8 \times 10^{-3}$

FIG. 7 Valeurs de la conductivité ionique molaire de quelques ions à 25 °C.

1 Caractériser une solution

- Le **titre massique** w d'une solution :

titre massique (%) → $w = \frac{m_{soluté}}{m_{solution}} \times 100$; $m_{soluté}$: masse de soluté (en g) ; $m_{solution}$: masse de solution (en g)

- La **densité** d d'une solution :

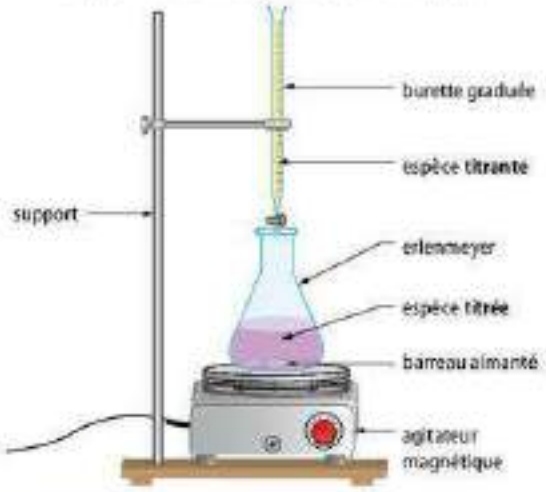
densité (sans unité) → $d = \frac{\rho}{\rho_{eau}}$; ρ : masse volumique de la solution (par exemple, en $kg \cdot m^{-3}$) ; ρ_{eau} : masse volumique de l'eau (par exemple, en $kg \cdot m^{-3}$)

- Pour préparer une solution de concentration en quantité de matière donnée, on procède à une **dilution**.

2 Titrage

- Un **titrage** est une **méthode de dosage** qui consiste à déterminer la quantité de matière (ou la concentration ou la masse) d'une espèce chimique à l'aide d'une transformation chimique.

Dispositif mis en jeu lors d'un titrage :

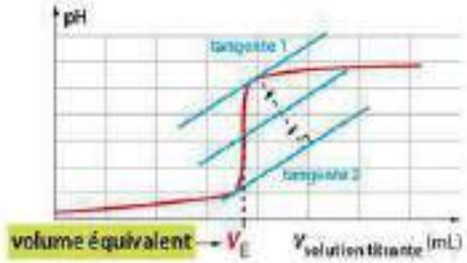


- L'**équivalence** du titrage correspond à l'état du système chimique pour lequel les espèces chimiques **titrante** et **titrée** ont été mélangées dans les **proportions stœchiométriques**.

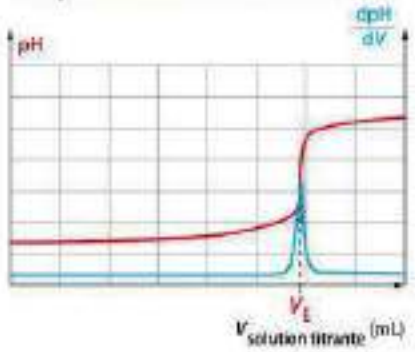
3 Titrage avec suivi pH-métrique

- L'**équivalence** est repérée par (ici, titrage d'un acide par une base) :

→ la **méthode des tangentes**



→ la **méthode de la dérivée**



- À l'**équivalence**, on a :

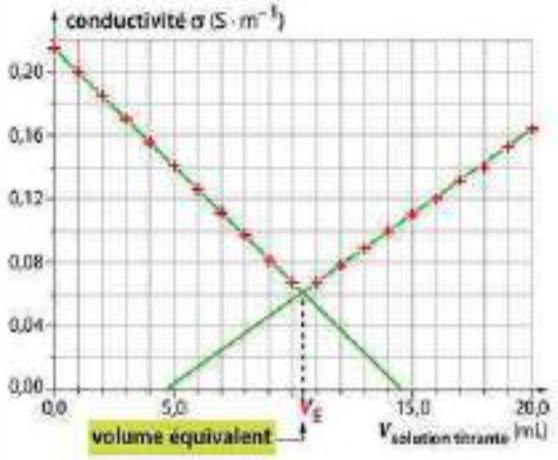
$n_A = n_B$ soit $c_A \cdot V_A = c_B \cdot V_B$

n : quantité de matière
c : concentration en quantité de matière
V_A : volume de l'acide A V_B : volume de la base B

4 Titrage avec suivi conductimétrique

- L'**équivalence** est repérée par (ici, l'une des espèces chimiques est ionique) :

→ **le changement de pente de la courbe de titrage**



- Les **conductivités molaires ioniques** λ (exprimées en $S \cdot m^2 \cdot mol^{-1}$) et les concentrations des ions en solution expliquent l'évolution de la pente de la courbe.

Vérifier l'essentiel

EN AUTONOMIE

Pour chaque question, choisir la ou les bonnes réponses. ➡ SOLUTIONS EN PAGE 593

Flash PAGE corrigés détaillés

Flash PAGE QCM interactifs

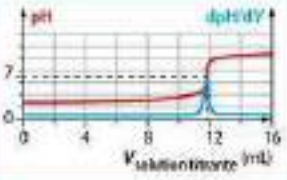
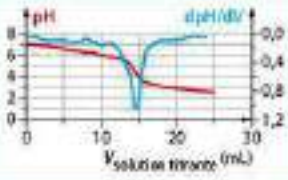
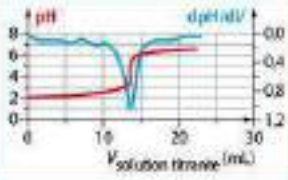
1 Caractériser une solution

	A	B	C
1 Le titre massique d'une solution est :	le quotient de la masse de soluté par la masse de la solution.	le produit de la masse de soluté par la masse de la solution.	le quotient de la masse de solution par la masse de soluté.
2 Le titre massique d'une solution peut être égal à :	0,25	25 g · L^{-1}	25 %
3 La masse volumique et la densité :	ont la même unité.	n'ont pas d'unité.	sont deux grandeurs différentes.

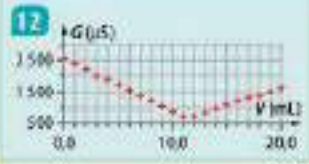
2 Titrage

	A	B	C
4 La réaction support d'un titrage est :	lente.	limitée.	unique.
5 Un titrage permet de déterminer :	une concentration.	une masse.	une quantité de matière.
6 Lors d'un titrage, le réactif limitant :	est le réactif titré jusqu'à l'équivalence.	est le réactif titrant jusqu'à l'équivalence.	change à l'équivalence.

3 Titrage avec suivi pH-métrique

	A	B	C
7 L'équivalence peut être toujours repérée :	par un changement de couleur.	par une méthode logicielle.	par une méthode géométrique.
8 À l'équivalence, les quantités de matière de l'acide et de la base :	sont égales.	sont toutes les deux nulles.	sont en proportions stœchiométriques.
9 La courbe bleue permet de déterminer l'équivalence lors du titrage d'une base par un acide.			

4 Titrage avec suivi conductimétrique

	A	B	C
10 En fonction du volume de la solution titrante versé, on suit l'évolution :	de l'absorbance de la solution.	du pH de la solution.	de la conductivité de la solution.
11 La pente de la courbe de titrage :	reste constante au cours du titrage.	dépend des conductivités molaires ioniques des ions.	dépend des concentrations des ions.
12 	D'après le graphique, le volume équivalent est V_E = 11,0 mL.	D'après le graphique, le volume équivalent est V_E = 12,0 mL.	D'après le graphique, le volume équivalent est V_E = 11,2 mL.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Acquérir les bases

1 Caractériser une solution

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Réaliser une solution de concentration donnée en soluté apporté à partir d'une solution de titre massique et de densité fournis.

➥ Acquérir les bases : 15 ➥ S'entraîner : 28

DONNÉE

- Masse volumique de l'eau $\rho_{eau} = 1{,}00 \times 10^3\ g \cdot L^{-1}$.

13 Acide sulfurique concentré

On dispose au laboratoire d'une solution aqueuse d'acide sulfurique concentré de titre massique $w = 95\ \%$.

Donnée : *masse molaire du soluté* $M(H_2SO_4) = 98\ g \cdot mol^{-1}$.

1. Que signifie $w = 95\ \%$?
2. Comparer sa teneur en acide à celles utilisées dans les batteries par exemple, et dont le titre massique est $w < 51\ \%$.
3. Calculer la densité de la solution du laboratoire sachant que sa concentration en quantité de matière est $17{,}8\ mol \cdot L^{-1}$.

14 Ammoniac

L'étiquette d'un flacon d'ammoniac commercial NH_3, conservé au laboratoire dans une armoire ventilée, indique un titre massique $w = 20\ \%$.



1. Comment cette solution peut-elle être préparée ?
2. On peut lire ces valeurs de la densité et de la masse molaire du soluté : $d = 0{,}95$ et $M(NH_3) = 17\ g \cdot mol^{-1}$.

Déterminer la concentration en quantité de matière de soluté dans cette solution.

15 Solution d'acide phosphorique

Une solution aqueuse commerciale d'acide phosphorique a une densité $d = 1{,}6$ et un titre massique $w = 75\ \%$.

Donnée : *masse molaire du soluté* $M(H_3PO_4) = 98\ g \cdot mol^{-1}$.

1. Calculer sa concentration en quantité de matière.
2. Lister le matériel nécessaire à la réalisation d'une dilution.
3. Indiquer comment préparer 1,0 L d'acide phosphorique à $0{,}10\ mol \cdot L^{-1}$ à partir d'une solution commerciale.

2 Titrage

EN AUTONOMIE

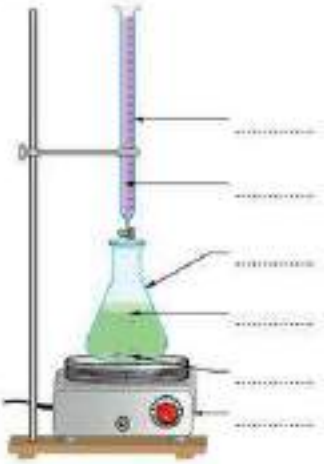
Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Établir la composition du système après ajout d'un volume de solution titrante, la transformation étant considérée comme totale.

➥ Acquérir les bases : 17

16 Qu'est-ce qu'un titrage ?

Pour déterminer la quantité de matière d'une espèce chimique A, on réalise son titrage à l'aide d'une espèce chimique B.



1. Recopier et compléter la légende du schéma.
2. Comment évolue la quantité de matière des espèces chimiques en fonction du volume de solution titrante versé ?
3. Définir l'équivalence du titrage.

17 Composition du système chimique

On réalise le titrage de l'ibuprofène, noté RCO_2H, par une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium (Na^+ (aq), HO^- (aq)) de concentration en quantité de matière c_B.

Données :

- *Couples acide-base mis en jeu :* RCO_2H *(aq) /* RCO_2^- *(aq) ;*

H_2O *(ℓ) /* HO^- *(aq).*

1. Écrire l'équation de la réaction chimique, support du titrage.
2. Quelles caractéristiques doit posséder une réaction chimique pour être utilisée lors d'un titrage ?
3. On se place à l'état final de la réaction à trois moments différents : avant l'équivalence, à l'équivalence et après l'équivalence.

Le tableau suivant permet de déterminer l'état du système chimique. Recopier et compléter le tableau en remplaçant les pointillés par les signes $<$, $>$ ou $=$.

Justifier les réponses.

Avant l'équivalence	À l'équivalence	Après l'équivalence
$n(RCO_2H_{initial}) - x$ ... 0	$n(RCO_2H_{initial}) - x$ ... 0	$n(RCO_2H_{initial}) - x$ ... 0
$n(HO^-_{versé}) - x$ ... 0	$n(HO^-_{versé}) - x$ ... 0	$n(HO^-_{versé}) - x$ ... 0
$n(HO^-_{versé})$ ... $n(RCO_2H_{initial})$	$n(HO^-_{versé})$ ... $n(RCO_2H_{initial})$	$n(HO^-_{versé})$ ... $n(RCO_2H_{initial})$

3 Titrage avec suivi pH-métrique

EN AUTONOMIE

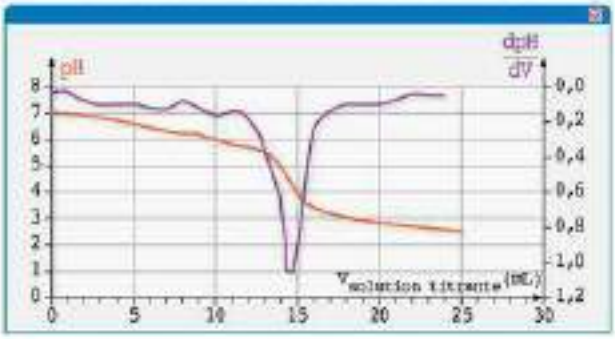
Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Exploiter un titrage pour déterminer une quantité de matière, une concentration ou une masse.

➡ Acquérir les bases : 21 ➡ S'entraîner : 24 25

18 Titrage d'un acide ou d'une base ?

On a tracé cette courbe de titrage à l'aide d'un logiciel :



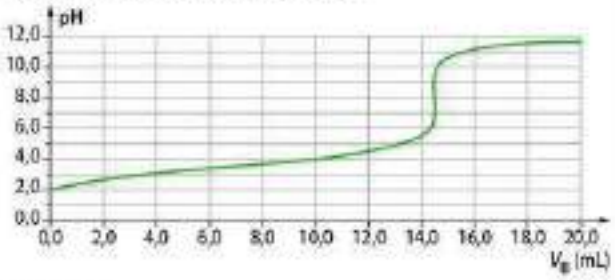
1. Schématiser le dispositif expérimental utilisé.
2. Expliquer comment repérer l'équivalence ?
3. La solution titrée est-elle un acide ou une base ? Justifier la réponse.
4. Quelle autre méthode aurait-on pu utiliser ? La décrire.

19 « Vitamine C 500 »

L'acide ascorbique $C_6H_8O_6$, couramment dénommé vitamine C, est présent dans de nombreux fruits et légumes, et sous forme de comprimés en pharmacie.

- *On écrase un comprimé de « vitamine C 500 ».*
- *On dissout la poudre dans un peu d'eau distillée, puis on introduit l'ensemble dans une fiole jaugée de 100,0 mL. On complète avec de l'eau distillée pour obtenir, après homogénéisation la solution S.*
- *On en prélève un volume $V_0 = 10,0$ mL que l'on dose par une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium de concentration en quantité de matière $c_B = 2,00 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.*

Voici la courbe de titrage obtenue :



Données :

- *Masse molaire $M(C_6H_8O_6) = 176$ g · mol^{-1}.*
- *Couples acide-base mis en jeu : $C_6H_8O_6$ (aq) / $C_6H_7O_6^-$ (aq) ; H_2O (ℓ) / HO^- (aq).*

1. Écrire l'équation de la réaction, support du dosage.
2. En utilisant du papier-calque, déterminer graphiquement le volume équivalent.
3. Calculer la quantité d'acide ascorbique dans les 10,0 mL de solution titrée.
4. En déduire la masse m (en mg) d'acide ascorbique contenue dans un comprimé. Justifier le titre de l'exercice.

20 Volume équivalent

Au cours d'une séance de TP, des élèves réalisent le titrage de l'acide éthanoïque d'un vinaigre par une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium.

Les valeurs des volumes équivalents V_E déterminés par les différents binômes sont regroupées ci-dessous.

• Binômes 1 à 16

N°	1	2	3	4	5	6	7	8
V_E (en mL)	12,2	11,9	16,3	12,3	12,4	11,8	12,0	11,2
N°	9	10	11	12	13	14	15	16
V_E (en mL)	11,6	12,9	11,7	12,1	11,5	12,8	11,9	12,0

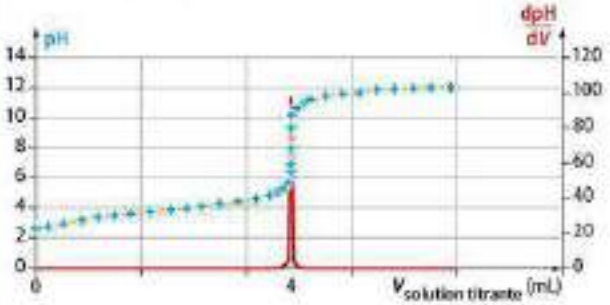
1. Proposer une méthode permettant de déterminer le volume équivalent.
2. Pourquoi les valeurs sont-elles différentes ?
3. Expliquer pourquoi une (ou des) valeur(s) est (sont) aberrante(s). Que faut-il faire ?
4. a. Quelle est la meilleure estimation de la valeur du volume V_E (FICHE PRATIQUE ➡ p. 538) ?
   b. Calculer la valeur de l'incertitude-type associée.
   c. Donner alors le résultat final du volume V_E.

21 Condition physique d'un cheval

La condition physique d'un cheval de course est liée à la concentration d'acide lactique dans ses muscles pouvant entraîner des crampes douloureuses après une compétition. Le seuil de fatigue correspond à une concentration en acide lactique dans le sang, supérieure à $3,5 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1}.

Un vétérinaire prélève sur un cheval le volume $V = 1,00$ mL de sang dont il extrait l'acide lactique. Cet acide est dissout dans l'eau pour obtenir une solution S de volume $V_S = 50,00$ mL qu'il titre par une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium (Na^+ (aq), HO^- (aq)) de concentration en quantité de matière : $c_1 = 1,00 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1}.

Données : *couples acide-base mis en jeu*
AH (aq) / A^- (aq) ; H_2O (ℓ) / HO^- (aq).



1. Écrire l'équation de la réaction, support du dosage, en utilisant la notation AH pour l'acide lactique.
2. Expliquer comment déterminer le volume équivalent.
3. Calculer la concentration en quantité de matière d'acide lactique c_S de la solution S.
4. Quel est l'état physique du cheval ?

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

4 Titrage avec suivi conductimétrique

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

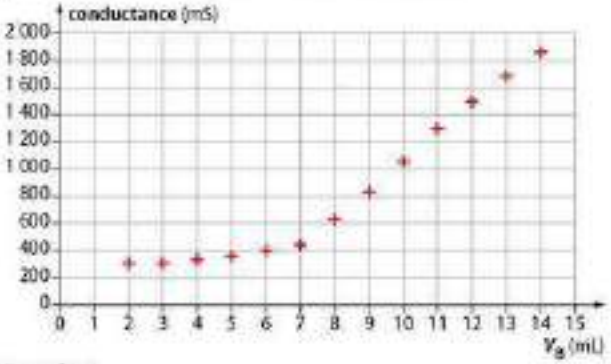
- Exploiter un titrage pour déterminer une quantité de matière, une concentration ou une masse.
- Justifier qualitativement l'évolution de la pente de la courbe de titrage à l'aide de données sur les conductivités molaires ioniques.

Acquérir les bases : 23 S'entraîner : 26 27 28

22 Titrage de l'aspirine

On prépare $V = 250$ mL d'une solution S en dissolvant une masse $m = 0{,}32$ g d'acide acétylsalicylique, noté AH, dans de l'eau distillée.

Un échantillon de volume $V_A = 100$ mL est titré par une solution d'hydroxyde de sodium (Na^+ (aq), HO^- (aq)) de concentration $c_B = 1{,}0 \times 10^{-1}$ mol · L^{-1}. Un suivi du titrage par conductimétrie donne la courbe suivante :



Données :

- *Masse molaire $M(AH) = 180$ g · mol^{-1}.*
- *Couples acide-base mis en jeu : $AH\,(aq)/A^-\,(aq)$; $H_2O\,(\ell)/HO^-\,(aq)$.*

1. Écrire l'équation de la réaction acide-base support du titrage.

2. Justifier l'allure de la courbe.

3. Déterminer le volume V_E de solution d'hydroxyde de sodium versé à l'équivalence.

4. Pour la solution S, calculer :
a. la concentration c_A en quantité de matière d'acide acétylsalicylique ;
b. la masse d'acide acétylsalicylique.
Est-elle compatible avec la valeur m donnée ?

23 Titrage des ions chlorure

Dans un laboratoire d'analyse, un technicien titre les ions chlorure dans 20,0 mL de lait mélangé à 200 mL d'eau déminéralisée par une solution de nitrate d'argent (Ag^+ (aq), NO_3^- (aq)) de concentration en quantité de matière $5{,}00 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.

Les ions argent réagissent avec les ions chlorure pour former un précipité de chlorure d'argent AgCl (s).

L'équation de la réaction support du dosage est :

$$Ag^+\,(aq) + Cl^-\,(aq) \rightarrow AgCl\,(s)$$

Le titrage est suivi par conductimétrie.

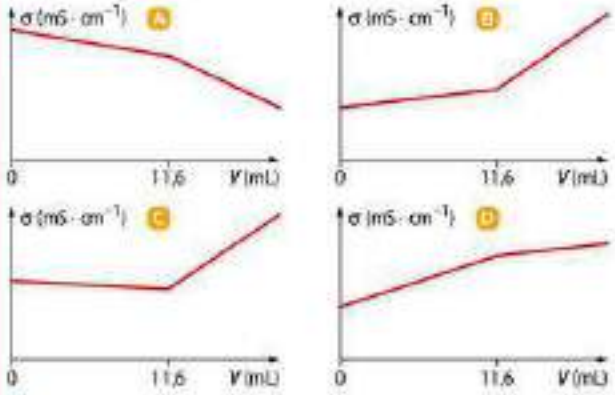
Données :

- *Conductivités molaires ioniques à 25 °C :*

$\lambda_{Cl^-(aq)} = 76{,}3 \times 10^{-4}$ S · m^2 · mol^{-1} ;
$\lambda_{NO_3^-(aq)} = 71{,}4 \times 10^{-4}$ S · m^2 · mol^{-1} ;
$\lambda_{Ag^+(aq)} = 61{,}9 \times 10^{-4}$ S · m^2 · mol^{-1}.

1. Schématiser le montage expérimental.

2. Parmi les représentations graphiques A à D, quelle est celle qui représente l'allure de l'évolution de la conductivité σ du mélange en fonction du volume V de solution de nitrate d'argent versé ? Justifier la réponse.



3. Quel est le volume équivalent ? Justifier la réponse.

Faire le point avant d'aller plus loin

PRÉPA BAC

Pour vérifier ses connaissances, répondre aux questions suivantes (sans regarder le cours !)

- Définir le titre massique d'une solution.
- Donner la différence entre densité et masse volumique.
- Définir un titrage.
- Citer les propriétés d'une transformation chimique qui sert de support à un titrage.
- Schématiser le dispositif expérimental d'un titrage.
- Définir l'équivalence d'un titrage.
- Expliquer les différentes méthodes de détermination de l'équivalence lors d'un titrage suivi par pH-métrie ou conductimétrie.
- Interpréter l'évolution des pentes d'une courbe de titrage conductimétrique.

Retrouver ces questions en version numérique Flash PAGE cartes mémos

Exercice résolu EN AUTONOMIE

24 Solution commerciale diluée



On dispose d'une solution commerciale S d'acide chlorhydrique de densité $d = 1,19$ et de titre massique $w = 37\,\%$.

On prépare une solution diluée dont un échantillon de volume $V_A = 10,0$ mL est titré avec suivi pH-métrique. La solution titrante est la soude (Na^+ (aq), HO^- (aq)) à la concentration $c_B = 3,00 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.

Le volume de soude versé pour atteindre l'équivalence est $V_E = 20,0$ mL.

Données :

- *Couples acide-base mis en jeu : H_2O (ℓ) / HO^- (aq) ; H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ).*
- *Masse molaire du soluté dans la solution S : $M(HCl) = 36,5$ g · mol^{-1}.*
- *Incertitudes-types : $u_{V_E} = 0,15$ mL ; $u_{V_A} = 0,10$ mL ; $u_{c_B} = 0,010$ mol · L^{-1}.*

1. **Déterminer** la concentration c_{com} en quantité de matière de la solution S.
2. Écrire l'équation de la réaction acide-base support du titrage réalisé.
3. **Déterminer** la concentration c en quantité de matière de la solution diluée.
4. Calculer l'incertitude-type u_c sur cette concentration sachant que :

$$\frac{u_c}{c} = \sqrt{\left(\frac{u_{V_E}}{V_E}\right)^2 + \left(\frac{u_{V_A}}{V_A}\right)^2 + \left(\frac{u_{c_B}}{c_B}\right)^2}$$

5. **Préciser** quelle verrerie a pu être utilisée pour préparer la solution diluée.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- La **densité** et le **titre massique** sont deux grandeurs qui caractérisent une solution commerciale.

LES VERBES D'ACTION

- **Déterminer** : mettre en œuvre une stratégie pour trouver un résultat.
- **Préciser** : apporter une information nouvelle.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. La concentration en quantité de matière est $c_{com} = \dfrac{m_{soluté}}{M \cdot V}$.

À partir de l'expression du titre massique $w = \dfrac{m_{soluté}}{m_{solution}}$, on déduit que

$m_{soluté} = m_{solution} \cdot w = \rho \cdot V \cdot w = \rho_{eau} \cdot d \cdot V \cdot w$ donc :

$c_{com} = \dfrac{\rho_{eau} \cdot d \cdot V \cdot w}{M \cdot V} = \dfrac{\rho_{eau} \cdot d \cdot w}{M}$ **AN :** $c_{com} = \dfrac{1,0 \times 1,19 \times 0,37}{36,5}$ soit $\boldsymbol{c_{com} = 12\ mol \cdot L^{-1}}$.

2. L'équation de la réaction acide-base support du titrage est :

$$H_3O^+ (aq) + HO^- (aq) \rightarrow 2\ H_2O\ (\ell)$$

3. À l'équivalence, on a : $n(H_3O^+) = n(HO^-)$ soit $c \cdot V_A = c_B \cdot V_E$. D'où $c = \dfrac{c_B \cdot V_E}{V_A}$.

AN : $c = \dfrac{3,00 \times 10^{-2} \times 20,0}{10,0}$ soit $\boldsymbol{c = 6,0 \times 10^{-2}\ mol \cdot L^{-1}}$.

4. $u_c = c \cdot \sqrt{\left(\dfrac{u_{V_E}}{V_E}\right)^2 + \left(\dfrac{u_{V_A}}{V_A}\right)^2 + \left(\dfrac{u_{c_B}}{c_B}\right)^2}$ **AN :** $u_c = 6,0 \times 10^{-2} \times \sqrt{\left(\dfrac{0,15}{20,0}\right)^2 + \left(\dfrac{0,10}{10,0}\right)^2 + \left(\dfrac{0,010}{3,00 \times 10^{-2}}\right)^2}$; $\boldsymbol{u_c = 0,020\ mol \cdot L^{-1}}$.

5. Le facteur de dilution est $\dfrac{c_{com}}{c}$, soit $\dfrac{12}{6,00 \times 10^{-2}} = 200$. Donc, pour préparer la solution diluée, on peut utiliser une pipette jaugée de 1 mL et une fiole jaugée de 200 mL.

QUELQUES CONSEILS

3. Utiliser la définition de l'équivalence.
5. Calculer le facteur de dilution.

EXERCICE SIMILAIRE

25 Titrage acide-base

On dispose d'une solution commerciale S d'acide sulfurique de densité $d = 1,82$ et de titre massique $w = 92\,\%$.

On prépare une solution diluée dont un échantillon de volume $V_A = 20,0$ mL est titré avec suivi pH-métrique.

La solution titrante est la soude (Na^+ (aq), HO^- (aq)) à la concentration $c_B = 5,00 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.

Le volume de soude versé pour atteindre l'équivalence est $V_E = 10,0$ mL.

Données :

- *Couples acide-base : H_2O (ℓ) / HO^- (aq) ; H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ).*
- *Masse molaire du soluté dans la solution S : $M(H_2SO_4) = 98$ g · mol^{-1}.*
- *Incertitudes-types : $u_{V_E} = 0,15$ mL ; $u_{V_A} = 0,10$ mL ; $u_{c_B} = 0,010$ mol · L^{-1}.*

■ Reprendre les questions 1 à 4 de l'exercice **24**.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Exercice résolu EN AUTONOMIE

26 Des larmes artificielles

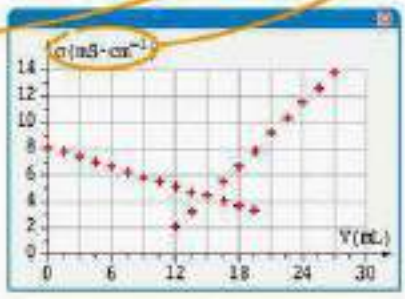


Ces unidoses de larmes artificielles contiennent une solution aqueuse de chlorure de sodium (Na^+ (aq), Cl^- (aq)) de titre massique $w = 0{,}9\ \%$ et dont la densité est $d = 1{,}0$.

On dose 5,0 mL de ces larmes artificielles (dans 1 unidose) par une solution de nitrate d'argent (Ag^+ (aq), NO_3^- (aq)) de concentration en quantité de matière $c = 5{,}00 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.

L'équation support du titrage est :

$$Ag^+ (aq) + Cl^- (aq) \rightarrow AgCl (s)$$



On enregistre la courbe ci-contre :

Donnée : *masse molaire M(NaCl) = 58,5 g · mol^{-1}.*

1. **Préciser** de quel type de titrage il s'agit.
2. Quel est le volume versé à l'équivalence ?
3. **Déterminer** la quantité de matière d'ions chlorure présents dans 1 unidose de 5,0 mL de larmes artificielles.
4. **En déduire** la masse de chlorure de sodium dissout, contenu dans 1 unidose. La **comparer** à celle indiquée par le fabricant sur la boîte.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- **L'équation support** permet de connaître la stœchiométrie de la réaction.
- La **grandeur** sur l'axe des ordonnées informe sur la méthode de titrage utilisée.

LES VERBES D'ACTION

- **Préciser** : apporter une information nouvelle.
- **Déterminer** : mettre en œuvre une stratégie pour trouver un résultat.
- **En déduire** : intégrer la donnée précédente pour répondre.
- **Comparer** : mettre en regard deux résultats pour en identifier les différences ou les similitudes.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. La conductivité σ montre qu'il s'agit d'un titrage suivi par conductimétrie.

2. On trace sur du papier-calque deux segments de droite passant par le maximum de points. Leur intersection a pour abscisse $V_E = 15$ mL.

3. À l'équivalence, les réactifs ont été mélangés dans les proportions stœchiométriques : $n(Cl^-) = n(Ag^+)$ donc $n(Cl^-) = c \cdot V_E$.

AN : $n(Cl^-) = 5{,}00 \times 10^{-2} \times 15 \times 10^{-3}$ soit $\boldsymbol{n(Cl^-) = 7{,}5 \times 10^{-4}\ mol.}$

4. $m(NaCl) = n(NaCl) \cdot M(NaCl)$

Or $n(NaCl) = n(Cl^-)$ donc $m(NaCl) = n(Cl^-) \cdot M(NaCl)$

AN : $m(NaCl) = 7{,}5 \times 10^{-4} \times 58{,}5$ soit $\boldsymbol{m(NaCl) = 4{,}4 \times 10^{-2}\ g.}$

Comme $d = 1{,}0$ alors 1 unidose de volume 5,0 mL a pour masse 5,0 g.

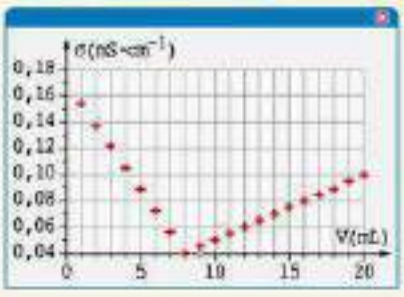
Le fabricant annonce un titre massique $w = 0{,}9\ \%$, donc la masse dans 1 unidose est : $m(NaCl) = w \cdot m_{solution} = 0{,}9 \times 10^{-2} \times 5{,}0$ soit $m(NaCl) = 4{,}5 \times 10^{-2}$ g, cette valeur est voisine de la masse calculée ($4{,}4 \times 10^{-2}$ g).

QUELQUES CONSEILS

2. Penser à prolonger les deux portions de droite.

4. Tenir compte de la densité de la solution.

EXERCICE SIMILAIRE



27 Une lotion capillaire

On désire vérifier que le pourcentage en masse de chlorure de sodium (Na^+ (aq), Cl^- (aq)) dissout dans une lotion capillaire correspond à 0,1 %, valeur indiquée sur le contenant.

On réalise un titrage suivi par conductimétrie d'un échantillon de lotion de 10 mL par une solution de nitrate d'argent (Ag^+ (aq), NO_3^- (aq)) dont la concentration est $c = 2{,}00 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.

L'équation support du titrage est : $Ag^+ (aq) + Cl^- (aq) \rightarrow AgCl (s)$

La courbe de titrage obtenue est présentée ci-contre.



Données : *masse molaire M(NaCl) = 58,5 g · mol^{-1} ; densité de la lotion d = 0,98.*

1. Préciser le volume versé à l'équivalence.
2. Déterminer la quantité de matière d'ions chlorure présents dans l'échantillon de lotion.
3. En déduire la masse de chlorure de sodium dissout, contenu dans cet échantillon. La comparer à celle indiquée par le fabricant.

S'entraîner pour maîtriser

SAVOIR RÉDIGER

28 Proposer une correction de la solution donnée par un élève à l'énoncé.

Énoncé

Les produits chimiques sont commercialisés purs ou en solutions très concentrées. À partir de ces composés, les laborantins préparent les solutions diluées utilisées en TP.

On dispose d'une solution d'acide nitrique concentré HNO_3 dont le titre massique est $w = 90\,\%$. La masse volumique de cette solution est $\rho = 1{,}4 \times 10^3\ g \cdot L^{-1}$.

Donnée : *masse molaire* $M(HNO_3) = 63\ g \cdot mol^{-1}$.

1. À quoi correspond le titre massique ?
2. Calculer la concentration en quantité de matière d'acide nitrique dans cette solution concentrée.
3. On souhaite préparer une solution diluée à $2{,}0 \times 10^{-1}\ mol \cdot L^{-1}$. Quelle verrerie faudra-t-il utiliser ?

Solution proposée par un élève

1. Le titre massique est le quotient de la masse d'acide nitrique par la masse d'un litre de solution.) Considérer un échantillon donné
2. La masse d'un litre de solution est 1,4 kg et il contient $0{,}90 \times 1{,}4 = 1{,}26$ kg de HNO_3 soit : $n = \frac{1{,}26}{63} = 0{,}020\ 0$ mol.) Garder la même unité
Sa concentration en quantité de matière est $c = 2{,}0 \times 10^{-2}\ mol \cdot L^{-1}$.
3. Il faut diluer d'un facteur 10, donc utiliser une pipette jaugée de 10 mL pour une fiole jaugée de 100 mL.

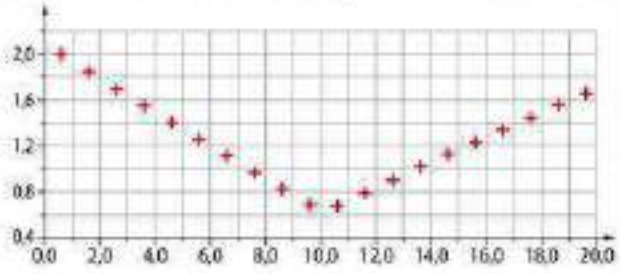
29 From a graph

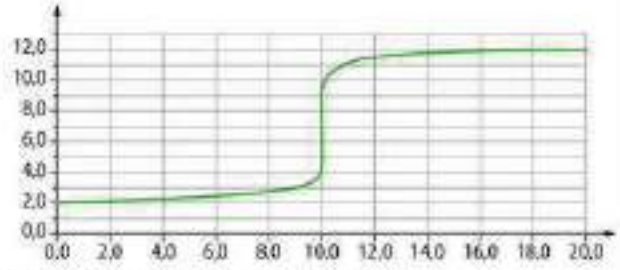
Two aqueous solutions of hydrogen chloride are titrated by caustic soda (aqueous solution of sodium hydroxide), one by pH-metry and the other by conductometry.

The equation of the titration support reaction is:

$$H_3O^+ (aq) + HO^- (aq) \rightarrow 2\ H_2O\ (\ell)$$

Graphs of results obtained during titrations are as follows.





Data: *ionic molar conductivity at 25 °C*

$\lambda_{H_3O^+ (aq)} = 34.98\ mS/m^2/mol^{-1}$;

$\lambda_{Na^+ (aq)} = 5.011\ mS/m^2/mol^{-1}$.

1. Specify the quantities represented on the axes of the graphs, as well as their units.
2. Determine the equivalent volume in both cases.
3. Explain the appearance of the graph obtained during the titration by conductometry.

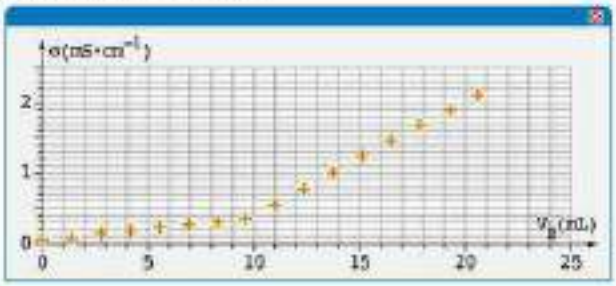
30 Acide benzoïque DÉMARCHES DIFFÉRENCIÉES

On titre par conductimétrie un volume $V = 100{,}0$ mL d'une solution aqueuse S d'acide benzoïque $C_6H_5CO_2H$ par une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium ($Na^+ (aq)$, $HO^- (aq)$) de concentration en quantité de matière : $c_B = 1{,}0 \times 10^{-1}\ mol \cdot L^{-1}$.

La réaction support du titrage est :

$$C_6H_5CO_2H + HO^- \rightarrow C_6H_5CO_2^- + H_2O$$

Voici la courbe obtenue :



DÉMARCHE EXPERTE

Calculer la concentration c en quantité de matière d'acide benzoïque dans la solution S.

DÉMARCHE AVANCÉE

1. Déterminer le volume équivalent.
2. Établir la relation entre les quantités de matière d'acide benzoïque et d'ions hydroxyde.
3. En déduire la concentration c en quantité de matière d'acide benzoïque dans la solution S.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

31 Acide chlorhydrique commercial

Sur l'étiquette d'un flacon d'acide chlorhydrique concentré, pris dans l'armoire du laboratoire, on lit :

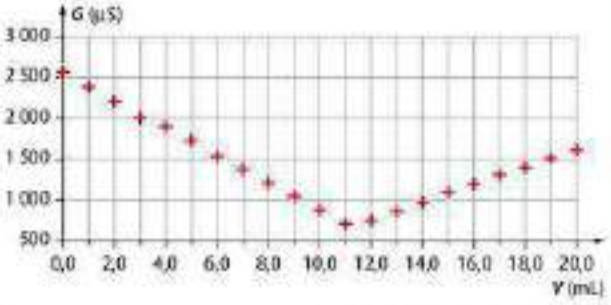
densité $d = 1,16$ titre massique $w = 33\ \%$ minimum

On appelle S_0 la solution de ce flacon, dont on veut connaître la concentration c_0 en quantité de matière.

On dilue 1 000 fois la solution S_0, on obtient alors une solution S_1 de concentration c_1.

On prélève précisément un volume $V_1 = 100,0$ mL de solution S_1 que l'on dose (par conductimétrie) par une solution aqueuse titrante d'hydroxyde de sodium de concentration $c_B = 1,00 \times 10^{-1}$ mol · L^{-1}.

La représentation graphique de la conductance de la solution en fonction du volume V de solution titrante versé est donnée ci-dessous.



JE VÉRIFIE QUE J'AI...

- correctement tracé les deux segments de droite pour trouver l'équivalence.

1. Écrire l'équation de la réaction acide-base support du titrage.

2. En utilisant du papier-calque, déterminer graphiquement le volume V_E versé à l'équivalence.

3. a. Écrire l'expression reliant c_1, c_B, V_E et V_1.
b. Calculer la concentration c_1 en quantité de matière de la solution S_1 d'acide chlorhydrique diluée.

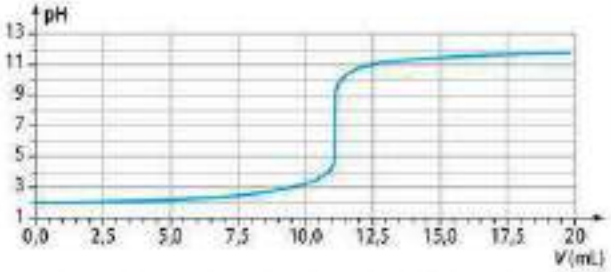
4. En déduire la concentration c_0 de la solution S_0 d'acide chlorhydrique concentrée.

5. Calculer la masse m_0 de soluté dissout dans un litre de solution.

6. Quelle est la masse m d'un litre de solution S_0 ?

7. a. Calculer le titre massique de la solution S_0.
b. L'indication de l'étiquette du flacon d'acide chlorhydrique concentré est-elle correcte ?

8. On dose maintenant par pH-métrie la solution S_1 avec la même solution titrante. Voici la courbe obtenue :



En utilisant du papier-calque, déterminer graphiquement le volume V_E versé à l'équivalence en explicitant la méthode employée.

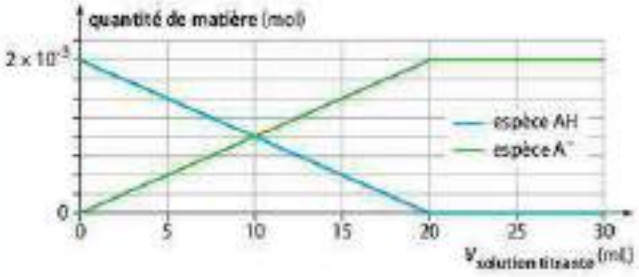
32 Évolution suivie par Python

On étudie le titrage d'une solution d'acide AH par la soude (Na^+ (aq), HO^- (aq)).

Pour suivre l'évolution des quantités de matière des espèces en fonction du volume de solution titrante versé, on rédige un programme en langage Python, le voici :

```
1  import matplotlib.pyplot as plt
2  import numpy as np
3
4  c_B=0.1 #concentration (mol/L) de la solution titrante
5  V_A=20  #volume initial (mL) de solution titrée
6  V_E=20  #volume équivalent (mL)
7  c_A =c_B*V_E/V_A
8
9  V_B1=np.linspace(0,V_E,V_E*10+1)
10 n_a1=(c_A*V_A-c_B*V_B1)*1e-3
11 n_b1=c_B*V_B1*1e-3
12 n_B1=0*V_B1
13
14 V_B2=np.linspace(V_E,V_E*1.5,V_E*10+1)
15 n_a2=0*V_B2
16 n_b2=(0*V_B2+c_B*V_E)*1e-3
17 n_B2=c_B*(V_B2-V_E)*1e-3
18
19 plt.plot(V_B1,n_a1,color="blue")
20
21
22 plt.plot(V_B2,n_a2,color="blue")
23
24
25 plt.show()
```

L'exécution du programme permet de tracer ces courbes :



Données :

• Couples acide-base : H_2O / HO^- (aq) ; AH (aq) / A^- (aq).

1. Écrire l'équation de la réaction acide-base support du titrage.

2. a. Indiquer la ligne du programme codant l'information correspondant à la concentration en quantité de matière de la solution titrée. Justifier la réponse.
b. Calculer la valeur de cette concentration.

3. Écrire les instructions cachées des lignes 20 et 23 permettant de tracer l'évolution de la quantité de matière d'ions A^- (aq) en fonction du volume de solution titrante versé.

4. Représenter l'allure de la courbe que l'on obtiendrait si on souhaitait suivre l'évolution de la quantité d'ions HO^- (aq) en fonction du volume de solution titrante versé.

JE VÉRIFIE QUE J'AI...

- compris qu'à l'équivalence il y a changement de réactif limitant.

33 Titrage du lait

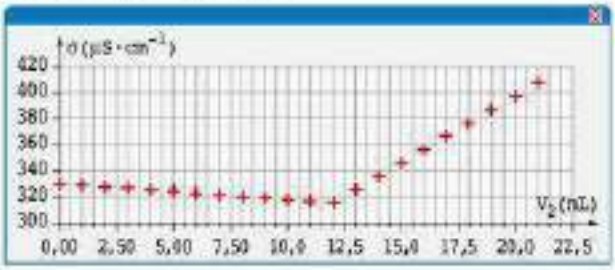


Avant de procéder à sa transformation ou à sa commercialisation, le lait doit subir divers contrôles pour garantir sa qualité et préserver la santé des consommateurs.

— PARTIE 1

On verse un volume $V_1 = 10{,}0$ mL de lait dans un bécher et on y plonge une sonde conductimétrique. On ajoute, mL par mL, une solution aqueuse S de nitrate d'argent (Ag^+ (aq), NO_3^- (aq)) de concentration $c_2 = 5{,}00 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1}.

Le suivi conductimétrique du titrage permet d'obtenir à l'aide d'un logiciel la courbe d'évolution de la conductivité σ du milieu réactionnel en fonction du volume V_2 de la solution de nitrate d'argent versé.



La transformation chimique met uniquement en jeu les ions chlorure et les ions argent selon cette équation de réaction :

$$Ag^+ (aq) + Cl^- (aq) \rightarrow AgCl (s)$$

Données :

- *Conductivités molaires ioniques à 25 °C :*

$\lambda_{Cl^-(aq)} = 76{,}3 \times 10^{-4}$ S · m² · mol^{-1} ;

$\lambda_{NO_3^-(aq)} = 71{,}4 \times 10^{-4}$ S · m² · mol^{-1} ;

$\lambda_{Ag^+(aq)} = 61{,}9 \times 10^{-4}$ S · m² · mol^{-1}.

- *Couples acide-base mis en jeu :*

H_2O (l) / HO^- (aq) ; H_3O^+ (aq) / H_2O (l) ; AH (aq) / A^- (aq).

- *Masse molaire de l'acide lactique* $M(AH) = 90$ g · mol^{-1}.

- *Incertitudes-types :* $u_{V_E} = 0{,}16$ mL ; $u_{V_A} = 0{,}10$ mL ; $u_{c_B} = 0{,}010$ mol · L^{-1}.

1. Quelle est l'origine de la conductivité initiale de la solution S ?

2. Interpréter la variation de la valeur de la conductivité σ du milieu réactionnel au cours du dosage.

Coup de pouce

Seuls les ions participent à la conductivité de la solution, pas le solide formé. Comparer les valeurs des conductivités molaires ioniques et se rappeler qu'à l'équivalence, il y a changement de réactif limitant.

3. Déterminer, en utilisant du papier-calque, le volume V_E de solution de nitrate d'argent, versé à l'équivalence.

4. Quelle est alors la relation entre la quantité de matière en ions argent introduits et la quantité de matière en ions chlorure initialement présents ?

5. En déduire la concentration c_1 en quantité de matière d'ions chlorure dans le lait.

— PARTIE 2

On considère qu'un lait frais a une concentration en acide lactique (noté AH) inférieure à 1,8 g · L^{-1}.

En supposant que c'est le seul acide présent dans le lait étudié, on effectue un dosage de cet acide par une solution d'hydroxyde de sodium (Na^+ (aq), HO^- (aq)), ou soude, de concentration $c_B = 5{,}00 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.

On prélève un volume $V_A = 20{,}0$ mL de lait que l'on place dans un bécher et on suit l'évolution du pH en fonction du volume V_B de soude versé.

On obtient ces valeurs :

V_B (en mL)	0	2,0	4,0	6,0	8,0	10	11
pH	2,9	3,2	3,6	3,9	4,2	4,6	4,9

V_B (en mL)	11,5	12	12,5	13	14	16
pH	6,3	8,0	10,7	11,0	11,3	11,5

6. a. Écrire l'équation de la réaction qui se produit lors du mélange.

b. Quelles caractéristiques doit présenter cette réaction pour être adaptée à un dosage ?

7. a. Déterminer le volume V_E de solution de soude, versé à l'équivalence.

b. En déduire la quantité de matière d'acide lactique présent dans le volume V_A de lait.

8. Quelle est la masse m d'acide lactique présent dans un litre de lait ? Conclure.

9. Évaluer l'incertitude-type sur la masse m sachant que :

$$\frac{u_m}{m} = \sqrt{\left(\frac{u_{V_E}}{V_E}\right)^2 + \left(\frac{u_{V_A}}{V_A}\right)^2 + \left(\frac{u_{c_B}}{c_B}\right)^2}$$

À L'ORAL

34 Titrage pH-métrique

Préparer un exposé oral permettant d'expliquer cette animation :

ANIMATION
Titrage pH-métrique



Ce court exposé devra pouvoir être réalisé sans note écrite.

Les mots-clés à utiliser

- pH
- agitateur magnétique
- barreau aimanté
- solutions titrée et titrante
- saut de pH
- équivalence

35 RETOUR SUR LA PAGE D'OUVERTURE

Les laboratoires effectuent régulièrement des analyses d'eau.

Préparer un exposé oral expliquant une technique d'analyse de l'eau pour déterminer sa concentration en un ou plusieurs de ses ions.



PRÉPA BAC

Développer ses compétences

36 Analyser un beurre — RÉSOLUTION DE PROBLÈME

45 min

AN/RAI Proposer une stratégie de résolution

Comme tous les produits frais, les laitages s'altèrent très vite et ne se conservent pas longtemps, des normes existent pour encadrer le taux de certains de leurs composés.

DOC 1 Beurre et fromage rances

L'acide butanoïque est l'un des composés responsables de l'odeur très forte et du goût piquant de certains fromages et beurres rances.

■ Dans les fromages, il est produit par fermentation de l'acide lactique du lait en présence de la bactérie *Clostridium tyrobutyricum*. Cette fermentation est modélisée par la réaction d'équation suivante :

$$2\,C_3H_6O_3\,(aq) \rightarrow C_4H_8O_2\,(aq) + 2\,CO_2\,(aq) + 2\,H_2\,(g)$$

acide lactique — acide butanoïque

Les premiers signes de cette fermentation sont généralement visibles après 6 à 10 semaines d'affinage, et se manifestent par un goût rance et, très souvent, un gonflement, voire un éclatement des fromages.



■ Le beurre est sensible à la réaction d'oxydation du butanal par le dioxygène de l'air qui forme l'acide butanoïque.

Un beurre est rance si son pourcentage massique en acide butanoïque est supérieur ou égal à 4 %.

Donnée : *masse molaire* $M(C_4H_8O_2) = 88{,}0\ g \cdot mol^{-1}$.

DOC 2 Protocole expérimental

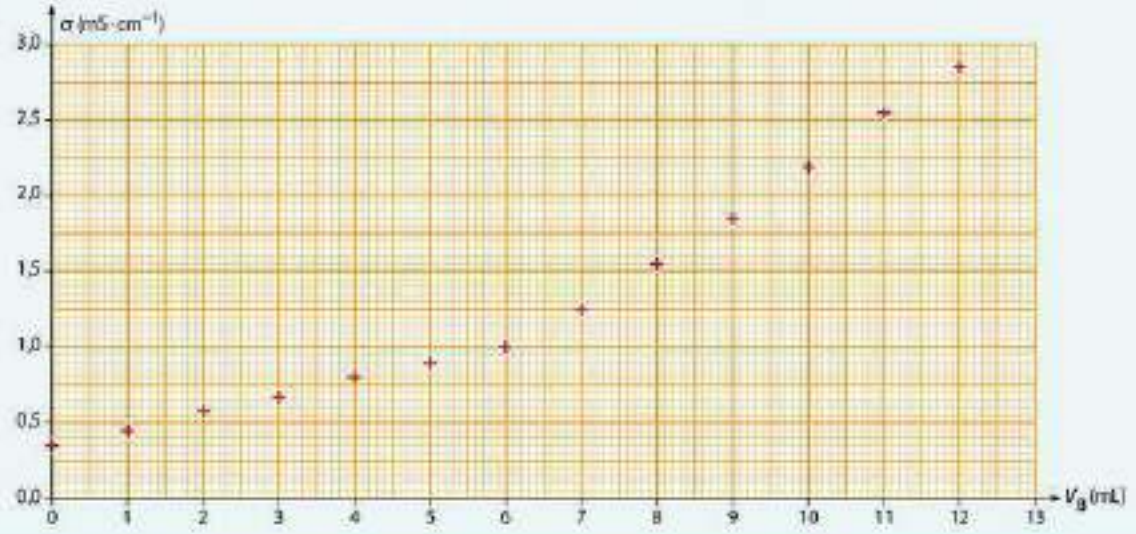
On considère qu'au cours du titrage de l'acide butanoïque, seul celui-ci réagit avec le réactif titrant.

- Dans un bécher, on introduit 8,0 g de beurre fondu auquel on ajoute un grand volume d'eau distillée, on obtient ainsi une solution S. On agite ensuite afin de dissoudre dans l'eau la totalité de l'acide butanoïque présent dans le beurre.
- On plonge dans le bécher la sonde d'un conductimètre, puis on verse, mL par mL, une solution d'hydroxyde de sodium (Na^+ (aq), HO^- (aq)) de concentration $c = 4{,}0 \times 10^{-1}\ mol \cdot L^{-1}$. Après chaque ajout de solution titrante, on mesure la conductivité σ de la solution S dans le bécher.

Données : *couples acide-base mis en jeu* $C_4H_8O_2\,(aq) / C_4H_7O_2^-\,(aq)$; $H_2O\,(\ell) / HO^-\,(aq)$; $H_3O^+\,(aq) / H_2O\,(\ell)$.

DOC 3 Courbe de titrage

La courbe représentant les variations de la conductivité σ de la solution S en fonction du volume V_B de solution d'hydroxyde de sodium, versé lors du titrage de l'acide butanoïque, est donnée ci-dessous.



QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Justifier le gonflement des fromages lors de la fermentation de l'acide lactique.
2. Écrire l'équation de la réaction support du titrage.
3. a. Définir l'équivalence.
   b. Comment peut-on repérer le volume équivalent sur la courbe fournie (Doc. 3) ?
   c. Déterminer sa valeur après avoir reproduit la courbe.

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

Le beurre analysé est-il rance ?

Il est attendu une prise d'initiatives et une présentation de la démarche suivie même s'il elle n'a pas abouti, et de justifier toute réponse.

37 Un soda universel

RÉSOLUTION DE PROBLÈME

60 min

(AN/RAI) Proposer une stratégie de résolution

Les différents ingrédients qui composent les boissons doivent être contrôlés, ils peuvent causer potentiellement des problèmes de santé tels que le diabète, l'insuffisance rénale, etc.

DOC 1 Boisson au cola

Au XIX^{e} siècle, une boisson à base de feuilles de coca et de noix de cola était préconisée par son inventeur comme remède contre les problèmes gastriques.



Une boisson de ce type est actuellement vendue partout comme soda. Sur l'étiquette, on lit :



Ingrédients :
eau gazéifiée au dioxyde de carbone ; sucre ; colorant (caramel) ; conservateur (acide benzoïque) ; acidifiant (acide phosphorique) ; extraits végétaux ; arômes naturels (extraits végétaux dont caféine).

Des études récentes laissent penser que l'acide phosphorique H_3PO_4, contenu dans ces sodas au cola, est responsable d'un accroissement des risques d'insuffisance rénale et d'ostéoporose s'il est consommé en quantités trop importantes.

Données :

- *Une canette de soda de 33 cL contient environ 35 mg de caféine.*
- *La masse d'une personne adulte ici est de 70 kg.*
- *Masse molaire de la caféine $M = 194,0\ g \cdot mol^{-1}$.*
- *Masses molaires atomiques M_X (en $g \cdot mol^{-1}$) :*
  $M_H = 1,0$; $M_C = 12,0$; $M_N = 14,0$; $M_O = 16,0$; $M_P = 31,0$.

DOC 2 Titrage de l'acide phosphorique

Pour déterminer la concentration en acide phosphorique dans le soda choisi, on dégaze un volume $V = 10,0$ mL de ce soda afin d'éliminer le dioxyde de carbone dissout.

On réalise ensuite le titrage de la boisson dégazée par une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium (Na^+ (aq), HO^- (aq)) de concentration en quantité de matière $c = 1,0 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.

Le titrage est suivi par pH-métrie.

Voici les mesures effectuées lors de ce titrage (V étant le volume de solution d'hydroxyde de sodium versé) :

V (en mL)	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
pH	2,9	3,1	3,2	3,3	3,6	4,5

V (en mL)	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
pH	5,8	6,2	6,3	6,4	6,4

On admet que seul le couple H_3PO_4 (aq) / $H_2PO_4^-$ (aq) intervient dans la réaction de titrage et que l'acide benzoïque étant en faible quantité, sa présence influe très peu sur le titrage de l'acide phosphorique.

Données :

- *Couples acide-base mis en jeu :*
  H_2O (ℓ) / HO^- (aq) ; H_3O^+ (aq) / H_2O (ℓ).

DOC 3 Dose journalière admissible

La dose journalière admissible DJA est la dose maximale d'une substance à laquelle on peut être exposée de façon répétée sans risque pour la santé.
La DJA est exprimée en mg par kg de masse corporelle et par jour.
Pour l'acide phosphorique, la DJA est de 70 mg · kg^{-1} · jour^{-1}.
Pour la caféine, la DJA est de 5 mg · kg^{-1} · jour^{-1}.

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. a. Évaluer à combien de canettes de soda correspond la dose journalière admissible de caféine pour une personne adulte.

b. En déduire la concentration en quantité de matière de caféine dans le soda choisi.

2. Écrire l'équation de la réaction support du titrage proposé (Doc. 2).

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

Combien de canettes de soda de 33 cL une personne adulte peut-elle consommer par jour en écartant tout risque de dangerosité de l'acide phosphorique pour sa santé ?

Il est attendu une prise d'initiatives et une présentation de la démarche suivie même s'il elle n'a pas abouti, et de justifier toute réponse.

38 Nettoyage chimique

ANALYSER ET SYNTHÉTISER DES DOCUMENTS

30 min

APP Rechercher et organiser l'information

Les molécules chimiques ont des usages très variés. On utilise par exemple du vinaigre pour nettoyer des pièces de monnaie.

DOC 1 Bain de jouvance

Un collectionneur souhaite nettoyer des pièces de monnaie en utilisant du vinaigre blanc, en effet, il a lu dans une revue que les pièces en argent, or et cuivre ne sont pas altérées par l'acide éthanoïque.

Il dispose justement dans sa cuisine d'une bouteille qu'il utilise régulièrement pour nettoyer les vitres de son appartement. Ce collectionneur sait que le vinaigre blanc est une solution d'acide éthanoïque. Pour rendre leur éclat à ses pièces, il les plonge dans un bain de vinaigre.



DOC 2 Données sur le vinaigre

- Le degré d'un vinaigre est la masse d'acide éthanoïque contenue dans 100 grammes de vinaigre.
- Densité $d = 1,0$.
- Masse molaire $M = 60,0\ g \cdot mol^{-1}$.
- Couple acide-base : $CH_3CO_2H\ (aq)\ /\ CH_3CO_2^-\ (aq)$.



DOC 3 Titrage du vinaigre

Un volume $V_A = 10,0$ mL de vinaigre dilué dix fois est titré par une solution d'hydroxyde de sodium de concentration $c_B = 0,100\ mol \cdot L^{-1}$.

Pour obtenir l'équivalence, il faut verser un volume d'hydroxyde de sodium $V_E = 13,3$ mL.

Données :

• Couples acide-base mis en jeu : $H_2O\ (\ell)\ /\ HO^-\ (aq)$; $H_3O^+\ (aq)\ /\ H_2O\ (\ell)$.

ANALYSE

1. Quelle est la masse volumique du vinaigre utilisé ?
2. Rédiger avec précision le protocole expérimental à mettre en œuvre pour diluer d'un facteur 10 le vinaigre pur du collectionneur.
3. Écrire l'équation de la réaction support du titrage entre l'acide éthanoïque, contenu dans le vinaigre, et l'eau.

SYNTHÈSE

La valeur de degré indiquée sur l'étiquette du vinaigre utilisé est-elle validée ?

VERS LE SUP'

39 Dosage de l'aspirine



L'aspirine, ou acide acétylsalicylique, noté AH, est le médicament le plus vendu dans le monde. Par dissolution d'un comprimé 500 mg, on prépare une solution aqueuse d'aspirine, ensuite on suit les deux étapes ci-après.

Étape 1 : dans un ballon, on transforme l'aspirine en la faisant réagir avec un excès de soude. On utilise $V_B = 10,0$ mL de soude dont la concentration en quantité de matière est $c_B = 1,0\ mol \cdot L^{-1}$. L'équation de réaction modélisant cette transformation s'écrit :

$$AH\ (aq) + 2\ HO^-\ (aq) \rightarrow B + C + H_2O\ (\ell) \qquad (1)$$

On récupère alors un volume $V = 100$ mL de solution S.

Étape 2 : on dose 10,0 mL de cette solution S (contenant l'excès de base HO^-) par une solution d'acide chlorhydrique de concentration $c_A = 5,0 \times 10^{-2}\ mol \cdot L^{-1}$. Expérimentalement, le volume équivalent d'acide versé vaut : $V_E = 8,4$ mL.

L'équation support du dosage s'écrit :

$$H_3O^+\ (aq) + HO^-\ (aq) \rightarrow 2\ H_2O\ (\ell) \qquad (2)$$

Donnée :

• La masse molaire de l'aspirine est $M(AH) = 180\ g \cdot mol^{-1}$.

1. Calculer la quantité initiale de matière $n_i\ (HO^-)$ d'ions hydroxyde introduits dans le ballon.
2. Déduire du volume équivalent versé, la quantité de matière n d'ions hydroxyde en excès, présente dans le prélèvement de 10,0 mL, puis la quantité de matière n' d'ions hydroxyde en excès, présente dans les 100,0 mL de la solution S de départ.
3. Déterminer la quantité de matière $n(HO^-)$ d'ions hydroxyde, consommée lors de la transformation 1.
4. Utiliser l'équation **1** pour en déduire la quantité d'aspirine présente dans le ballon.
5. En déduire la masse m d'aspirine contenue dans le comprimé et la comparer à celle indiquée sur la boîte.

GESTE ECE n° 1 — Flash PAGE — vidéo

Élevage d'artémias

TABLEUR-GRAPHEUR

Contexte



L'artémia est le nom scientifique d'un petit crustacé qui a la particularité de vivre dans des milieux très salés tels que certains lacs et marais salants.

Le projet professionnel de Noémie est d'implanter un élevage d'artémias dans les marais salants du Sud de la France, la région de son enfance.

Le but de cette épreuve est d'analyser un échantillon de l'eau du marais afin de savoir si elle est favorable au développement de ce crustacé. On sait que cette eau contient exclusivement des ions sodium et des ions chlorure.

Documents mis à disposition

DOC 1 Milieu de vie

Les artémias ont besoin de vivre dans un milieu marin dont la concentration en masse moyenne d'ions chlorure Cl^- est supérieure à 30 g · L^{-1}. Dans ces conditions, leur développement n'est pas compromis car les prédateurs aquatiques ne supportent pas des salinités aussi élevées.

DOC 2 Préparation de la solution S_1

Un prélèvement d'échantillon d'eau a été effectué dans le marais salant où Noémie pense implanter l'élevage d'artémias. Cette eau a été diluée 10 fois pour obtenir une solution S_1.

DOC 3 Réaction de précipitation

Les ions chlorure Cl^- réagissent avec les ions argent Ag^+ selon la réaction de précipitation d'équation :

$$Ag^+ (aq) + Cl^- (aq) \rightarrow AgCl (s)$$

Cette transformation peut être considérée comme totale.

Matériel mis à disposition

- Ordinateur muni d'un tableur-grapheur
- Conductimètre avec sa sonde de conductimétrie (préalablement étalonné)
- Agitateur magnétique avec un turbulent
- Béchers, pipettes jaugées, erlenmeyer, burette graduée
- Solution de nitrate d'argent ($Ag^+ (aq), NO_3^- (aq)$) de concentration $c_2 = 1{,}00 \times 10^{-1}$ mol · L^{-1}
- Échantillon d'eau du marais salant
- Eau distillée

Travail à effectuer

1. ANA **Proposition de protocole expérimental** *(10 min conseillées)*

■ À partir des documents et du matériel disponible, proposer un protocole expérimental qui permette de déterminer la concentration en ions chlorure d'un échantillon V_1 = 10,0 mL de la solution S_1 obtenue à partir de l'eau prélevée dans le marais salant.

Être en mesure de présenter le protocole

2. REA **Mise en œuvre du protocole expérimental** *(35 min conseillées)*

■ Mettre en œuvre le protocole et effectuer l'acquisition d'une courbe à l'aide du tableur-grapheur.

Être en mesure de présenter l'acquisition informatisée

3. VAL **Exploitation du résultat obtenu** *(15 min conseillées)*

***Donnée** : masse molaire M_{Cl} = 35,5 g · mol^{-1}.*

1. À partir de la courbe obtenue et de l'équation de réaction fournie, déterminer en détaillant les différentes étapes du raisonnement, la concentration c en quantité de matière d'ions chlorure dans l'eau du marais salant.
2. Cette concentration c est-elle favorable au développement des artémias ? Justifier la réponse.
3. Identifier les principales sources d'incertitude de ce résultat.

Défaire le montage et ranger la paillasse.

PISTE POUR LE GRAND ORAL PRÉPA BAC

Pour se préparer à l'Oral
➥ Livret LES CLÉS DU BAC
(en début de manuel)

UNE QUESTION

Comment établir la composition d'une eau ?

Enjeu de la question

L'eau douce est une ressource essentielle pour l'humanité. Son utilisation fait l'objet d'une attention particulière depuis son prélèvement, où l'on doit mesurer sa qualité, jusqu'au rejet des eaux usées dépolluées. La dépollution permet d'augmenter la ressource disponible à un moindre coût, notamment dans les régions touchées par les pénuries d'eau et la sécheresse.

Proposition de plan de présentation

1. L'eau contient des ions.
2. Les couples de l'eau et son pH.
3. Méthodes physiques d'analyse.
4. Méthodes chimiques d'analyse.

Exemple de support de présentation



Les espèces chimiques d'une eau

Les mots-clés

conductance ▸ conductivité molaire ionique ▸ ions oxonium et hydroxyde ▸ pH ▸ couples A / B ▸ titrage ▸ équivalence

QUESTIONS D'APPROFONDISSEMENT POSSIBLES



UN EXEMPLE DE PROJET PROFESSIONNEL

Responsable de la qualité et de la quantité d'eau utilisée par son usine, **le technicien d'exploitation de l'eau** a un rôle clé dans les industries qui utilisent cette ressource tout au long du processus de fabrication, par exemple les entreprises de fabrication de papiers et cartons. Le technicien d'exploitation de l'eau veille aussi au recyclage de l'eau et à son impact sur l'environnement lorsqu'elle est rejetée. Autonome et ayant le sens des responsabilités, ce professionnel travaille souvent seul. Il surveille les données sur un écran d'ordinateur, effectue des prélèvements et des contrôles quotidiens, veille au bon état des équipements, dose les produits pour l'assainissement de l'eau, etc. Grâce à un bagage technique varié, il est recherché par les employeurs qui ne peuvent se passer d'un tel professionnel.



Après le bac : *2 ans pour préparer un BTS métiers de l'eau ou un DUT génie biologique. D'autres formations à bac+2 existent dans les domaines de l'environnement, de la chimie, de la biochimie, de la biologie, du contrôle industriel ou de l'électrotechnique.*

Autres métiers : *responsable de réseau d'assainissement, responsable de réseau eau potable, chef de station de traitement des eaux.*

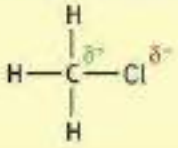
Évolution temporelle

Avant d'aborder le chapitre EN AUTONOMIE

LES ACQUIS INDISPENSABLES

1re Enseignement de spécialité

- Un **tableau d'avancement** permet de suivre l'évolution d'un système chimique et de déterminer la quantité de matière de ses réactif(s) et produit(s) au cours d'une transformation chimique.
- Pour une transformation totale, **l'avancement final** d'une réaction chimique est égal à l'avancement maximal.
- **La dérivée d'une fonction** MATHS
La dérivée d'une fonction en un point correspond à la limite du taux de variation de la fonction en ce point.
- Une liaison covalente entre deux atomes d'électronégativités suffisamment différentes est **polaire ou polarisée**. Dans une liaison polarisée :
  - l'atome le plus électronégatif porte une **charge partielle négative** δ^- ;
  - l'atome le moins électronégatif porte une **charge partielle positive** δ^+.



POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

Flash PAGE

Pour chaque situation, rédiger une réponse qui explique en quelques lignes le raisonnement.

SITUATION 1

On considère une transformation totale dont l'équation de réaction est :

$$\alpha\,\mathbf{A} + \beta\,\mathbf{B} \rightarrow \gamma\,\mathbf{C} + \delta\,\mathbf{D}$$

A, B, C et D sont des espèces chimiques, B est le réactif limitant. α, β, γ et δ sont les nombres stœchiométriques.

À l'aide d'un tableau d'avancement, déterminer la quantité de matière de chaque espèce chimique à l'état final.

SITUATION 2 MATHS

Ce graphique représente l'évolution temporelle d'une grandeur C :



Exprimer le taux de variation de C à l'instant t_2 en fonction de t_1 et t_3.

Que représente graphiquement le taux de variation de C à l'instant t_2 lorsque t_1 et t_3 s'approchent de t_2 ?

SITUATION 3

Le méthanal a pour formule CH_2O.



Établir le schéma de Lewis du méthanal en représentant les charges partielles éventuelles.



CHAPITRE

4

CHIMIE

d'un système chimique



Comment caractériser et modifier la durée d'une transformation chimique, ici, la formation de la rouille qui est extrêmement lente ?

→ EXERCICE 21

NOTIONS ET CONTENUS

- Transformations lentes et rapides. Facteurs cinétiques. Catalyseurs.
- Vitesse volumique de disparition d'un réactif et d'apparition d'un produit.
- Temps de demi-réaction. Loi de vitesse d'ordre 1.
- Mécanisme réactionnel. Formalisme de la flèche courbe.
- Interprétation microscopique des facteurs cinétiques.

CAPACITÉS EXPÉRIMENTALES

- Mettre en évidence des facteurs cinétiques et l'effet d'un catalyseur. → Activités 1 et 3
- Mettre en œuvre une méthode physique pour suivre l'évolution d'une concentration et déterminer la vitesse volumique de formation d'un produit ou de disparition d'un réactif. → Activité 4

→ Pour préparer l'ECE

TP

COMPÉTENCES :
APP Rechercher et organiser l'information
RÉA Mettre en œuvre un protocole expérimental

La catalyse

Qu'est-ce qu'un catalyseur ? Quels sont les différents types de catalyse ?

DOC 1 Catalyse, catalyseur

Un catalyseur est une substance permettant d'accélérer ou d'orienter une transformation chimique. Il est consommé au cours de la transformation, puis régénéré, de sorte qu'il n'apparaît pas dans le bilan réactionnel. On le note cependant au-dessus de la flèche de l'équation de réaction, par exemple :

$$\alpha A + \beta B \xrightarrow{\text{catalyseur}} \gamma C + \delta D$$

La catalyse est dite :
- **homogène** si les réactifs et le catalyseur sont dans une même phase ;
- **hétérogène** si les réactifs et le catalyseur forment deux phases distinctes ;
- **enzymatique** si le catalyseur est une **enzyme**.

ANIMATION
Catalyse enzymatique



DOC 2 La catalase



La catalase est une **enzyme** qui catalyse la dismutation de l'eau oxygénée.

On trouve de la catalase dans le navet, dans les racines des plantes, dans les levures, ou dans le foie des animaux.

VOCABULAIRE

Enzyme : protéine servant à catalyser les réactions biologiques.

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

L'eau oxygénée H_2O_2 peut réagir lentement sur elle-même selon l'équation suivante, on parle de *dismutation* de l'eau oxygénée :

$$2\,H_2O_2\,(aq) \rightarrow 2\,H_2O\,(\ell) + O_2\,(g)$$

- Dans quatre tubes à essais numérotés, verser de l'eau oxygénée « 20 volumes » sur une hauteur de quelques centimètres.
- Compléter les tubes à essai comme indiqué ci-dessous.

Tube	Ajouter
1	–
2	quelques gouttes de solution de sulfate de fer (Fe^{2+} (aq), SO_4^{2-} (aq)) à 0,5 mol · L^{-1}
3	un fil de platine
4	une pointe de spatule de catalase ou un petit morceau de navet ou de foie de bœuf haché



EXPÉRIENCE ET EXPLOITATION

1 Mettre en œuvre le protocole expérimental fourni.

2 a. Quel est le rôle du tube à essais n° 1 ? Qu'y observe-t-on ? Pourquoi ?

b. Quelle est la nature du dégagement gazeux observé dans les tubes n° 2, 3 et 4 ?

c. Les ions Fe^{2+} (aq) et le métal Pt (s) jouant tous les deux ici le rôle de catalyseurs, écrire l'équation de la réaction associée à la transformation chimique observée dans les tubes à essais n° 2, 3 et 4.

3 Expliquer le principe de la catalyse enzymatique en s'aidant éventuellement de schémas.

4 a. Schématiser le tube n° 3. Où le dégagement gazeux se situe-t-il ?

b. Pourquoi utilise-t-on dans l'industrie des catalyseurs solides en poudre ou en nid d'abeilles ?

SYNTHÈSE

4 Expliquer le rôle d'un catalyseur et qualifier les catalyses opérées dans les différents tubes à essais en justifiant.

Je réussis si...

- **Je sais expliquer le rôle d'un catalyseur.**
- **Je connais et je sais identifier les différents types de catalyse.**

CLASSE INVERSÉE

COMPÉTENCES :
APP Rechercher et organiser l'information
ANA RAI Faire des prévisions à l'aide d'un modèle

Le formalisme de la flèche courbe

Comment modéliser les transferts électroniques lors des transformations chimiques ?

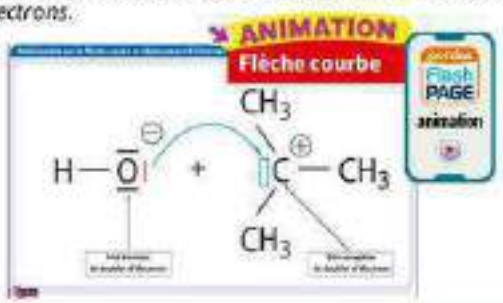
DOC 1 Sites donneurs et sites accepteurs de doublet d'électrons

- Un **site donneur** de doublet d'électrons est un site de forte densité électronique. Il peut être localisé sur un doublet non liant ou une double liaison.
- Un **site accepteur** de doublet d'électrons est un site de faible densité électronique. Il peut être localisé sur un élément portant une **lacune électronique** ou sur un atome portant une **charge partielle positive** δ^+.

DOC 2 La flèche courbe

Une transformation chimique peut se décomposer au niveau moléculaire en plusieurs étapes ou actes élémentaires, au cours desquels des transferts électroniques ont lieu.

La flèche courbe modélise le transfert d'électrons entre deux entités chimiques au cours d'un acte élémentaire d'une transformation. Elle ***part** d'un site donneur de doublet d'électrons* et ***pointe** vers un site accepteur de doublet d'électrons.*



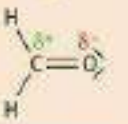
VOCABULAIRE

- **Lacune électronique** : doublet d'électrons manquant, représenté par un rectangle vide sur le schéma de Lewis 1.
- **Charge partielle** : excédent de charge électrique apparaissant sur un atome lorsqu'il est engagé dans une liaison covalente polarisée 2.

1



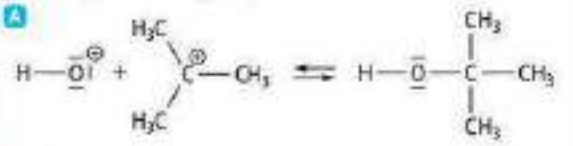
2



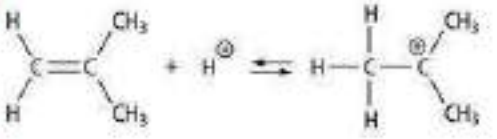
DOC 3 Réactions élémentaires

Voici l'équation de quelques réactions élémentaires :

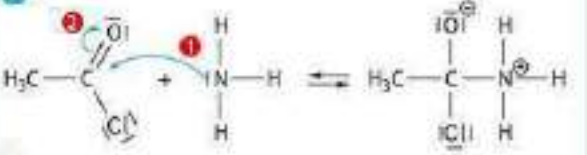
A



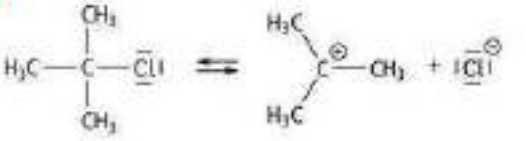
B



C



D



EXPLOITATION ET ANALYSE

1 a. Dans les réactifs des équations A et B (doc. 3), localiser les sites donneurs et les sites accepteurs de doublet d'électrons. Justifier en représentant les **lacunes électroniques** manquantes le cas échéant.

b. Représenter par une flèche courbe les transferts de doublets d'électrons sur ces deux équations et identifier les nouvelles liaisons formées.

2 a. Dans l'équation C (doc. 3), justifier le sens de la flèche 1.

***Données** : électronégativités χ comparées de quelques éléments chimiques : $\chi(O) > \chi(Cl) > \chi(N) > \chi(C) \approx \chi(H)$.*

b. Quel serait le produit issu de la seule flèche 1 ?

c. Pourquoi représente-t-on deux flèches courbes sur cette étape élémentaire ?

3 a. Représenter la flèche courbe sur l'équation D.

b. Comment l'expliquer ?

SYNTHÈSE

4 Expliquer en une dizaine de lignes le formalisme de la flèche courbe.

Je réussis si...

- **Je sais identifier un site donneur et un site accepteur de doublet d'électrons.**
- **Je sais justifier le sens d'une flèche courbe.**

TP

COMPÉTENCES :
(ANA/RAI) Proposer une stratégie de résolution
(RÉA) Mettre en œuvre les étapes d'une démarche

Facteurs cinétiques

De quels paramètres la durée d'une transformation chimique dépend-elle ?

DÉMARCHE EXPERTE

À l'aide du matériel proposé (doc. 2), élaborer un protocole expérimental permettant de déterminer l'influence de différents paramètres sur la durée d'une transformation.
Après validation par le professeur, mettre en application ce protocole et présenter les résultats dans un compte rendu.

DÉMARCHE AVANCÉE

1. a. Comment peut-on évaluer la durée au bout de laquelle la transformation a suffisamment avancé pour que la solution devienne opaque ?
b. Préparer trois mélanges en faisant varier la concentration en quantité de matière des réactifs et mesurer pour chacun la durée nécessaire pour que la solution devienne opaque.
c. Que dire de l'influence de la concentration des réactifs sur la durée d'une transformation ?

2. En reproduisant un des mélanges, cité dans la question 1. b, étudier l'influence de la température sur la durée d'une transformation.

DÉMARCHE ÉLÉMENTAIRE

1. a. Placer un morceau de papier blanc marqué d'une croix sous trois béchers différents. À l'aide d'un chronomètre, déterminer la durée au bout de laquelle chacun des mélanges suivants – préparés avec des éprouvettes graduées – devient opaque.

	MÉLANGE	
	40 mL de thiosulfate de sodium à ...	10 mL d'acide chlorhydrique à ...
1	0,1 mol · L^{-1}	1 mol · L^{-1}
2	0,02 mol · L^{-1}	1 mol · L^{-1}
3	0,02 mol · L^{-1}	0,1 mol · L^{-1}

b. Que dire de l'influence de la concentration en quantité de matière des réactifs sur la durée de la transformation ?

2. a. Reproduire le mélange du bécher n° 1 et déterminer la durée au bout de laquelle il devient opaque à 0 °C, puis à 40 °C. *Les solutions devront être à la bonne température avant le mélange.*
b. Que dire de l'influence de la température sur la durée de la transformation ?

DOC 1 Une réaction chimique

- Les ions thiosulfate $S_2O_3^{2-}$ réagissent avec les ions hydrogène H^+ pour former un précipité de soufre S selon la réaction lente d'équation :

$$2\,S_2O_3^{2-}\,(aq) + 4\,H^+\,(aq) \rightarrow 2\,S\,(s) + 2\,SO_2\,(aq) + 2\,H_2O\,(\ell)$$

- Avec les solutions disponibles (doc. 2), le mélange de 40 mL de thiosulfate de sodium et de 10 mL d'acide chlorhydrique permet la formation d'une quantité suffisante de précipité pour opacifier le milieu réactionnel.

DOC 2 Du matériel utile



- Thiosulfate de sodium aux concentrations 0,1 mol · L^{-1} et 0,02 mol · L^{-1}
- Acide chlorhydrique à 1 mol · L^{-1} et à 0,1 mol · L^{-1}
- Un bain thermostaté à 40 °C
- Un bain d'eau glacée
- Un chronomètre
- Trois morceaux de papier blanc et un marqueur noir
- Éprouvettes graduées de 20 mL et de 50 mL
- Trois béchers de 50 mL.

Je réussis si...

- **Je sais mettre en évidence des facteurs cinétiques.**
- **Je note les résultats à l'aide de schémas ou de tableaux.**
- **J'analyse l'influence des facteurs cinétiques étudiés.**
- **Je décris précisément le protocole expérimental.**

TP

COMPÉTENCES :
(RÉA) Mettre en œuvre les étapes d'une démarche
(VAL) Confronter un modèle à des résultats expérimentaux

Suivi cinétique d'une transformation

Comment déterminer expérimentalement si une réaction est d'ordre 1 ?

DOC 1 Loi de Beer-Lambert

L'absorbance d'une solution colorée est proportionnelle à la concentration en quantité de matière de l'espèce colorante qu'elle contient.

Pour établir numériquement cette loi de la manière la plus précise possible, on mesure l'absorbance de plusieurs solutions étalons (cinq conviennent) préparées à partir d'une solution mère.

La loi est déduite du graphique représentant l'absorbance en fonction de la concentration.

Pour un maximum de précision, on règle le spectrophotomètre sur la longueur d'onde correspondant au maximum d'absorption.

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

- À l'aide d'un spectrophotomètre, d'une solution de diiode à $5{,}0 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1} et de la verrerie nécessaire, établir la relation numérique entre l'absorbance et la concentration en quantité de matière de diiode.
- Relever pendant 15 minutes l'absorbance d'un mélange de 10,0 mL d'iodure de potassium à 0,25 mol · L^{-1} et de 10,0 mL de peroxodisulfate de sodium à $2{,}5 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1}.

Pour cela, déclencher l'acquisition au moment du mélange, verser rapidement un peu du mélange dans une cuve, puis la placer dans le spectrophotomètre.



GESTE ECE n° 3

Flash PAGE vidéo

DOC 2 Approche du suivi cinétique par Python

Un programme en langage Python permet de tracer :
- l'évolution temporelle de la concentration en diiode I_2 et en ions peroxodisulfate $S_2O_8^{2-}$, de la vitesse volumique d'apparition du diiode I_2 et de disparition des ions $S_2O_8^{2-}$;
- l'évolution de la vitesse volumique d'apparition du diiode I_2 et de disparition des ions $S_2O_8^{2-}$ en fonction de la concentration en $S_2O_8^{2-}$;
- la modélisation de cette vitesse de disparition.

```
import matplotlib.pyplot as plt

# Valeurs expérimentales de l'absorbance A et du temps t
t = [...] # A compléter
A = [...] # A compléter

# Calcul de [I2] (notée CI2) à partir des valeurs de A
CI2 = []
for i in range (0,len(A)) :
    CI2.append(...) # A compléter

# Tracé du graphe [I2](t)
plt.plot(t,CI2,'g+')
plt.xlabel('temps (s)', fontsize = 12)
plt.ylabel('[I2]', fontsize = 12)
plt.title('[I2] en fonction du temps', fontsize = 14)
plt.show()

# Valeur de la concentration initiale en S2O82- (notée C0S)
C0S = ...  # A compléter

# Calcul de la concentration en S2O82- (notée CS) au cours de la transformation
CS = []
for i in range (0,len(CI2)) :
    CS.append(...) # A compléter
```

EXPÉRIENCE ET EXPLOITATION

1 Réaliser le protocole expérimental en prenant en compte les informations fournies (doc. 1).

2 Écrire l'équation de la réaction qui se produit dans le milieu réactionnel.

Données :

• Couples oxydant-réducteur : $S_2O_8^{2-}/SO_4^{2-}$; I_2/I^-.

3 a. À l'aide des données, des valeurs expérimentales obtenues et en s'aidant éventuellement d'un tableau d'avancement, écrire les instructions des cinq lignes du programme *A compléter*.

b. Exécuter le programme.

CONCLUSION

4 Peut-on dire que la réaction étudiée est d'ordre 1 par rapport aux ions $S_2O_8^{2-}$? Justifier la réponse.

Je réussis si...

- **Je sais établir numériquement la relation entre absorbance et concentration en quantité de matière.**
- **Je sais mettre en œuvre un suivi temporel de l'absorbance.**
- **Je sais utiliser un langage de programmation pour compléter les valeurs d'une liste, pour effectuer un calcul à partir de ces valeurs.**
- **Je sais reconnaître une réaction d'ordre 1.**

1 Modélisation macroscopique

Transformations, facteurs cinétiques

Une **transformation** est dite **lente** si on peut suivre son évolution à l'œil nu ou à l'aide d'un appareil de mesure courant (FIG. 1A).
Une **transformation** est dite **rapide** si sa durée ne dépasse pas la durée de persistance rétinienne, soit $1/10^{8}$ de seconde (FIG. 1B).

■ Pour suivre l'évolution d'un système, on choisira un *capteur* qui permet de mesurer une *grandeur reliée à la quantité de matière d'une des espèces* chimiques du milieu.

EXEMPLE

On pourra utiliser un spectrophotomètre si la réaction met en jeu une espèce colorée, un manomètre si au moins l'une des espèces est gazeuse, un conductimètre si au moins l'une des espèces est ionique.

■ Les **facteurs cinétiques** sont les paramètres expérimentaux que l'on peut faire varier pour modifier la durée de la transformation.

La **température** et la **concentration en quantité de matière des réactifs** sont des **facteurs cinétiques** : plus la température du milieu réactionnel et/ou plus la concentration des réactifs est élevée, plus la transformation est rapide.



FIG. 1 A Transformation lente entre les ions peroxodisulfate et les ions iodure. B Transformation rapide entre les ions plomb et les ions iodure.

Catalyse, catalyseur

Un **catalyseur** est une espèce chimique qui accélère ou oriente une transformation chimique sans modifier l'état final du système chimique. Il est consommé, puis régénéré en égale proportion au cours de la transformation.

■ Le catalyseur n'intervient pas dans le bilan réactionnel, donc n'apparaît pas dans l'équation de réaction.

■ La catalyse est dite **homogène** si les réactifs et le catalyseur sont dans une même phase fluide : liquide ou gazeuse. Elle est dite **hétérogène** si les réactifs et le catalyseur forment deux phases distinctes.

Lorsque le catalyseur est solide, la réaction est catalysée en surface du catalyseur. On l'utilise donc sous une forme qui augmente la surface de contact avec les réactifs : poudre, structure alvéolaire...

La catalyse est dite **enzymatique** lorsque le catalyseur est une enzyme : protéine servant à accélérer les réactions biochimiques (FIG. 2).

Lorsque plusieurs réactions sont possibles, le choix du catalyseur peut orienter la transformation : on dit que le **catalyseur** est **sélectif**.
Dans certains cas, notamment en catalyse enzymatique, le catalyseur n'agit que sur un réactif donné et pour une transformation particulière : on dit que le **catalyseur** est **spécifique** (FIG. 2).

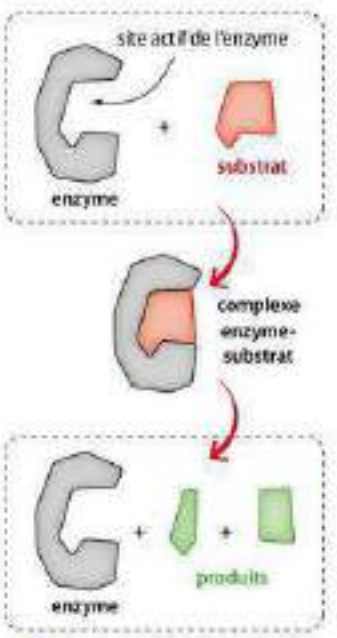


FIG. 2 Le réactif, appelé substrat, se fixe au site actif de l'enzyme pour y être transformé. L'enzyme se retrouve intacte à la fin de la transformation.

BONUS

Catalyse enzymatique



Cette animation permet de visualiser le principe de la catalyse enzymatique.

2 Suivi temporel

■ Le suivi temporel d'une transformation chimique consiste à suivre l'évolution de la quantité de matière des réactifs et des produits au cours du temps.

Vitesse volumique

■ On étudie des transformations pour lesquelles **le volume du milieu réactionnel est constant**.

La **vitesse volumique d'apparition d'un produit** est définie par :

$$v_{\text{Produit}} = \frac{d[\text{Produit}]}{dt}$$

vitesse volumique (en mol · L⁻¹ · s⁻¹) ; concentration en quantité de matière du produit (en mol · L⁻¹) ; temps (en s)

EXEMPLE

Dans la réaction d'équation : $S_2O_8^{2-}(aq) + 2\,I^-(aq) \rightarrow I_2(aq) + 2\,SO_4^{2-}(aq)$

la vitesse volumique d'apparition du diiode est : $v_{I_2} = \frac{d[I_2]}{dt}$.

On peut la déterminer graphiquement (FIG. 3).

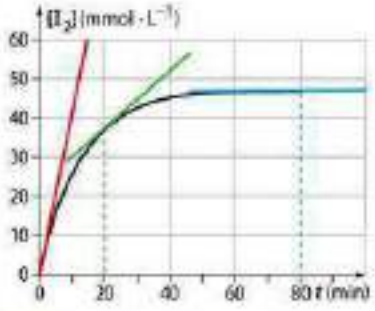


FIG. 3 Évolution de la concentration en quantité de matière de diiode en fonction du temps. La vitesse volumique d'apparition du diiode est le coefficient directeur de la tangente à la courbe tracée à t = 0 min, à t = 20 min et à t = 80 min.

La **vitesse volumique de disparition d'un réactif** est définie par :

$$v_{\text{Réactif}} = -\frac{d[\text{Réactif}]}{dt}$$

vitesse volumique (en mol · L⁻¹ · s⁻¹) ; concentration en quantité de matière du réactif (en mol · L⁻¹) ; temps (en s)

En effet, la concentration en quantité de matière du réactif diminue au cours du temps, donc la dérivée de la concentration par rapport au temps est négative. On ajoute donc un signe moins « − » pour que la vitesse soit positive.

UN PONT VERS LES MATHS

Dérivée d'une courbe en un point

La dérivée d'une courbe en un point est le coefficient directeur de la tangente à la courbe en ce point.

→ Fiche MATHS p. 535

Temps de demi-réaction

Le **temps de demi-réaction**, noté $t_{1/2}$, est la durée au bout de laquelle l'avancement de la réaction vaut la moitié de l'avancement final x_f.

■ Le temps de demi-réaction permet d'évaluer la **durée caractéristique** d'une transformation chimique.

■ Sur le graphique représentant l'avancement x en fonction du temps, $t_{1/2}$ est l'abscisse du point d'ordonnée $\frac{x_f}{2}$ (FIG. 4). On considère que la réaction est terminée au bout de **6 à 7 fois** le temps de demi-réaction.

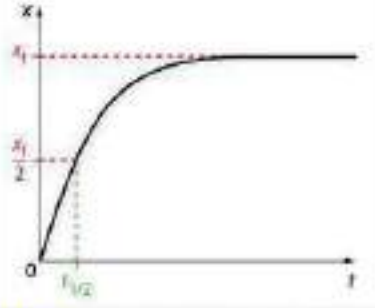


FIG. 4 Détermination graphique du temps de demi-réaction.

Loi de vitesse d'ordre 1

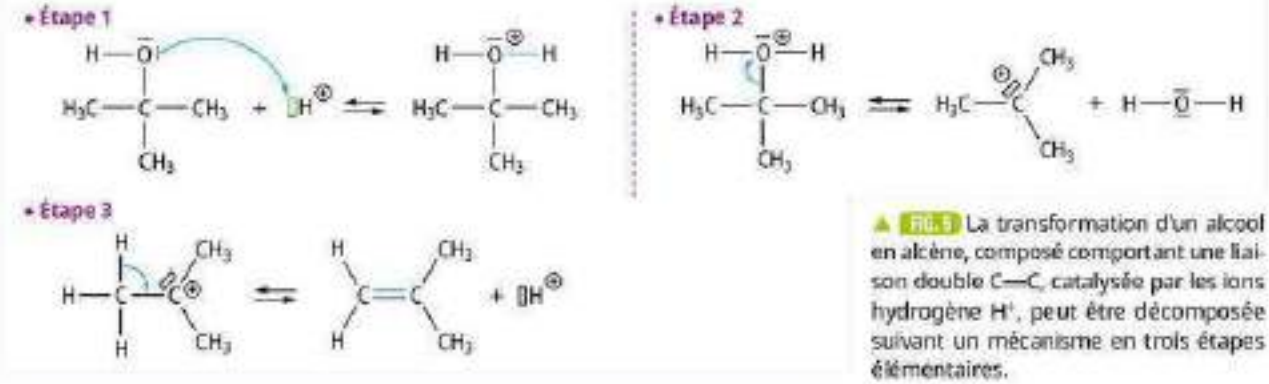
Une **réaction** est dite **d'ordre 1** par rapport à un réactif A si la vitesse volumique de disparition de A ou d'apparition d'un produit est proportionnelle à la concentration en quantité de matière de ce réactif.

L'ordre d'une réaction se déduit uniquement de l'expérience.

3 Modélisation microscopique

Mécanisme réactionnel

■ Une réaction complexe peut être décomposée au niveau moléculaire en **étapes élémentaires** ou **actes élémentaires**, l'ensemble de ces étapes constitue le **mécanisme réactionnel** (FIG. 5). Il permet notamment de rendre compte de la loi de vitesse établie expérimentalement.



▲ FIG. 3 La transformation d'un alcool en alcène, composé comportant une liaison double C=C, catalysée par les ions hydrogène H^+, peut être décomposée suivant un mécanisme en trois étapes élémentaires.

Un **intermédiaire réactionnel** est une espèce chimique **formée** au cours d'une étape élémentaire, **puis consommée** au cours d'une étape ultérieure. Un **catalyseur** est une espèce chimique **consommée** au cours d'une étape élémentaire, **puis régénérée** au cours d'une étape ultérieure (FIG. 5).

Le catalyseur permet la formation d'intermédiaires réactionnels plus réactifs que les réactifs initiaux, ce qui accélère la transformation.

L'ajout d'un **catalyseur modifie le mécanisme réactionnel** d'une transformation.

■ L'équation de la réaction modélisée par un mécanisme réactionnel se retrouve en faisant le bilan de tout ce qui est consommé et produit au cours des différentes étapes. On peut l'écrire en additionnant les étapes du mécanisme.

Formalisme de la flèche courbe

■ Lors des étapes élémentaires, la formation et/ou la rupture de liaisons s'explique par le déplacement d'un ou de plusieurs doublets d'électrons. Ce déplacement est modélisé par le formalisme de la flèche courbe.

■ Un **site donneur de doublet d'électrons** est un site de forte densité électronique. Un **site accepteur de doublet d'électrons** est un site de faible densité électronique (FIG. 4).

On **modélise** le déplacement des doublets d'électrons lors d'une étape d'un mécanisme réactionnel par une **flèche courbe** qui **part d'un site donneur** de doublet d'électrons et qui **pointe vers un site accepteur** de doublet d'électrons.

■ Parfois, on représente deux flèches courbes dans une seule étape car l'intermédiaire réactionnel issu de l'une seule de ces flèches est trop instable.

Remarque. Il arrive au sein d'une entité qu'un doublet liant soit fortement attiré par l'atome le plus électronégatif de la liaison. Il s'ensuit une rupture de liaison sans mouvement de doublet d'électrons d'un site donneur vers un site accepteur. La flèche courbe modélise alors la rupture de la liaison (FIG. 5, ÉTAPE 2).

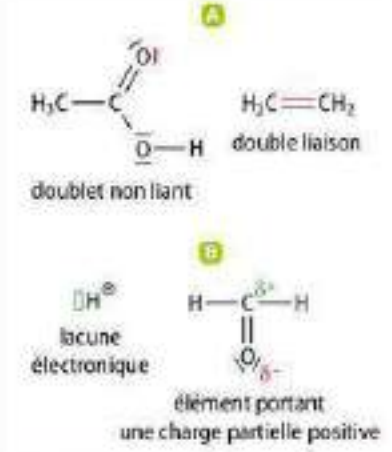


FIG. 4 A Sites potentiellement **donneurs** de doublet d'électrons.
B Sites potentiellement **accepteurs** de doublet d'électrons.

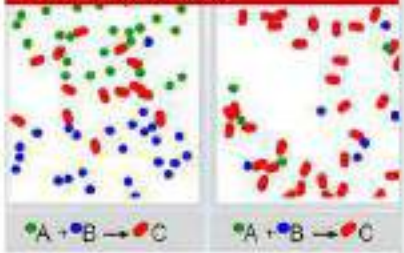
Interprétation microscopique des facteurs cinétiques

Un choc entre deux entités réactives est dit **efficace** s'il entraîne une **modification des liaisons chimiques** de ces deux entités.

Lorsque la **température augmente**, l'agitation thermique augmente, donc les chocs entre les entités des réactifs sont plus fréquents et plus violents, par conséquent les **chocs efficaces sont plus fréquents**.

De même, lorsque la **concentration des réactifs augmente**, il y a plus d'entités de réactifs par unité de volume, donc les chocs entre les entités des réactifs sont plus fréquents, par conséquent les **chocs efficaces sont plus fréquents**.

BONUS
Facteurs cinétiques



Cette animation permet de visualiser l'influence des facteurs cinétiques.

1 Modélisation macroscopique

Transformations

- **rapides** : suivi de l'évolution impossible
- **lentes** : suivi possible avec capteur adapté

Catalyseur

La transformation est accélérée et orientée :

Réactifs + catalyseur ⟶ *Produits* + catalyseur (même quantité)

Facteurs cinétiques

- **Température**
- **Concentrations en réactifs**

Si température ↗ et/ou si concentration en réactifs ↗ alors durée de la transformation ↘

Catalyse

- **homogène**
- **hétérogène**
- **enzymatique**

2 Suivi temporel

Vitesse volumique

Produit

vitesse volumique d'apparition d'un produit (mol · L⁻¹ · s⁻¹) ; dérivée temporelle de la concentration en quantité de matière du produit (mol · L⁻¹)

$$v_{Produit} = \frac{d[Produit]}{dt}$$

Réactif

vitesse volumique de disparition d'un réactif (mol · L⁻¹ · s⁻¹) ; dérivée temporelle de la concentration en quantité de matière du réactif (mol · L⁻¹)

$$v_{Réactif} = -\frac{d[Réactif]}{dt}$$

Temps de demi-réaction $t_{1/2}$

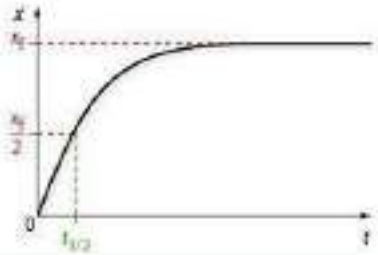
avancement au temps de demi-réaction (mol) : $x(t_{1/2}) = \frac{x_f}{2}$ ← avancement final (mol)

Réaction d'ordre 1

par rapport à un réactif A

vitesse volumique de disparition du réactif A (mol · L⁻¹ · s⁻¹) : $v_A = k \cdot [A]$; constante de proportionnalité (s^{-1}) ; concentration en quantité de matière du réactif A (mol · L⁻¹)

vitesse volumique d'apparition d'un produit P (mol · L⁻¹ · s⁻¹) : $v_P = k' \cdot [A]$; constante de proportionnalité (s^{-1}) ; concentration en quantité de matière du réactif A (mol · L⁻¹)

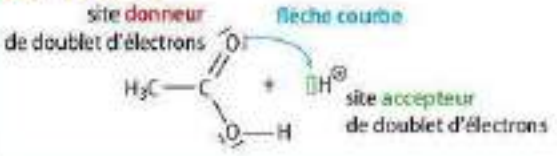


3 Modélisation microscopique

Mécanisme réactionnel = Σ étapes élémentaires

- **Intermédiaires réactionnels** : produits puis consommés
- **Catalyseur** : consommé puis régénéré

Flèche courbe



Vérifier l'essentiel

EN AUTONOMIE

Pour chaque question, choisir la ou les bonnes réponses. ➡ SOLUTIONS EN PAGE 593

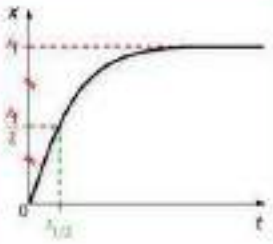
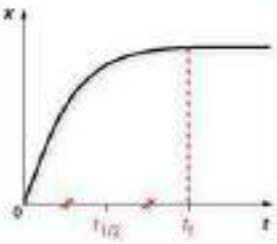
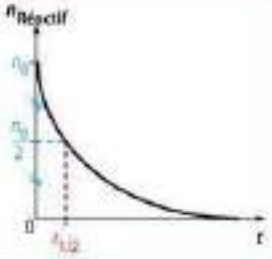
Flash PAGE corrigés détaillés

Flash PAGE QCM interactifs

1 Modélisation macroscopique

	A	B	C
1 Une transformation lente :	se produit en plusieurs années.	peut être suivie par un appareil de mesure courant.	implique un changement de coloration du milieu réactionnel.
2 Un facteur cinétique est :	un paramètre influant sur la vitesse d'une transformation.	un paramètre influant sur l'état final d'un système chimique.	une espèce chimique susceptible d'accélérer une transformation.
3 Un catalyseur :	augmente la quantité finale de produit formé.	accélère une transformation chimique.	apparaît dans le bilan réactionnel.

2 Suivi temporel

	A	B	C
4 L'expression de la vitesse volumique de disparition d'un réactif est :	$v_{Réactif} = \frac{dn_{Réactif}}{dt}$	$v_{Réactif} = -\frac{d[Réactif]}{dt}$	$v_{Réactif} = \frac{d[Réactif]}{dt}$
5 Le graphique qui permet de déterminer le temps de demi-réaction $t_{1/2}$ est :			
6 Une réaction est d'ordre 1 par rapport à un réactif A si :	la vitesse volumique de disparition de A est proportionnelle à sa concentration en quantité de matière.	le nombre stœchiométrique devant A vaut 1.	A est l'unique réactif.

3 Modélisation microscopique

	A	B	C
7 Un intermédiaire réactionnel est :	formé lors de la première étape du mécanisme réactionnel.	consommé, puis régénéré au cours du mécanisme réactionnel.	formé, puis consommé au cours du mécanisme réactionnel.
8 Un site accepteur de doublet d'électrons peut être :	un site comportant une lacune électronique.	un élément portant une charge partielle négative δ^-.	une double liaison.
9 Une flèche courbe sur une étape d'un mécanisme réactionnel :	part d'un site donneur de doublet d'électrons.	part d'un élément portant une lacune électronique.	pointe vers un site de faible densité électronique.
10 Pour augmenter la fréquence des chocs efficaces, on peut :	augmenter la température du milieu.	augmenter la quantité de matière des réactifs.	augmenter le volume du milieu réactionnel.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Acquérir les bases

1 Modélisation macroscopique

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Transformations, facteurs cinétiques
- Justifier le choix d'un capteur de suivi temporel de l'évolution d'un système.
- Identifier, à partir de données expérimentales, des facteurs cinétiques.

➥ Acquérir les bases : 12 ➥ S'entraîner : 24 28

Catalyse, catalyseur
- Citer les propriétés d'un catalyseur et identifier un catalyseur à partir de données expérimentales.

➥ Acquérir les bases : 13 ➥ S'entraîner : 29

11 Choix d'un capteur

1. Rappeler ce qu'est une transformation lente et une transformation rapide.

2. Voici l'équation de trois réactions chimiques lentes :

❶ $H_2O_2\,(aq) + 2\,I^-\,(aq) + 2\,H_3O^+\,(aq) \rightarrow I_2\,(aq) + 4\,H_2O\,(\ell)$

❷ $Zn\,(s) + 2\,H_3O^+\,(aq) \rightarrow Zn^{2+}\,(aq) + H_2\,(g) + 2\,H_2O\,(\ell)$

❸ $R{-}Cl\,(\ell) + 2\,H_2O\,(\ell) \rightarrow R{-}OH\,(\ell) + H_3O^+\,(aq) + Cl^-\,(aq)$

Parmi les capteurs suivants, lequel (ou lesquels) est (sont) adapté(s) au suivi de chacune des réactions fournies ? Justifier la réponse.

a. Conductimètre
b. Spectrophotomètre
c. Manomètre
d. pH-mètre

12 Suivi manométrique

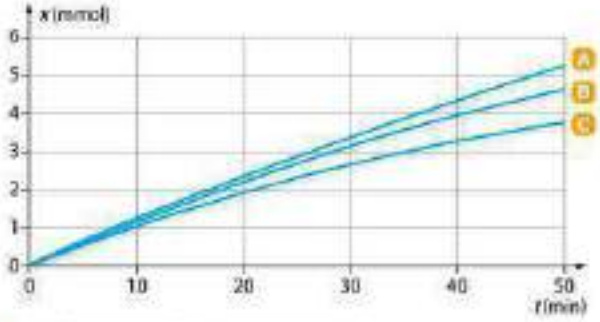
À l'aide d'un manomètre, on suit la transformation dont l'équation de réaction est :

$$Zn\,(s) + 2\,H_3O^+\,(aq) \rightarrow Zn^{2+}\,(aq) + H_2\,(g) + 2\,H_2O\,(\ell)$$

Les données expérimentales sont :

Expérience	1	2	3
$m(Zn)$ (en g)	0,50	0,50	0,50
$[H_3O^+]$ (en mol · L^{-1})	0,50	0,25	0,40
Température (en °C)	25	25	25

On obtient l'avancement de la réaction pour les trois expériences :



1. Justifier le choix du capteur utilisé.

2. Quel est le facteur cinétique mis en évidence ?

3. Associer à chacune des courbes le numéro de l'expérience correspondante. Justifier la réponse.

13 Eau de Javel

L'eau de Javel contient des ions hypochlorite ClO^-. Ils peuvent donner lieu à la réaction d'équation :

$$2\,ClO^-\,(aq) \rightarrow O_2\,(g) + 2\,Cl^-\,(aq)$$

Cette réaction qui peut durer plusieurs mois peut être accélérée en présence d'ions cobalt (II) Co^{2+} ou en présence de métaux comme le zinc, le fer ou le cuivre.

1. Pourquoi dit-on que les ions cobalt (II), que le zinc, le fer et le cuivre sont des catalyseurs ?

2. Parmi les éléments présentés, lesquels donnent lieu à une catalyse homogène ? à une catalyse hétérogène ? Justifier les réponses.

3. Pourquoi est-il déconseillé de conserver l'eau de Javel dans des contenants métalliques ?

14 Fabrication d'un cidre



Une des phases de la fabrication d'un cidre, est la *flottaison*. Au cours de cette phase, le moût de pomme est clarifié, c'est-à-dire nettoyé de ses impuretés (microbes, moisissures, levures...).
Pour améliorer et accélérer la clarification, on utilise de la pectinestérase, une protéine permettant la coagulation des pectines, macromolécules présentes dans de nombreux fruits, dont les pommes.

1. Pourquoi dit-on que la pectinestérase est un catalyseur ?

2. Quel type de catalyse est ici mis en jeu ? Justifier la réponse.

2 Suivi temporel

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Vitesse volumique, temps de demi-réaction
- À partir de données expérimentales, déterminer une vitesse volumique de disparition d'un réactif, une vitesse volumique d'apparition d'un produit ou un temps de demi-réaction.

➥ Acquérir les bases : 17 ➥ S'entraîner : 26 28

Loi de vitesse d'ordre 1
- Identifier, à partir de données expérimentales, si l'évolution d'une concentration suit ou non une loi de vitesse d'ordre 1.

➥ Acquérir les bases : 18 ➥ S'entraîner : 26

15 Vitesses volumiques

1. Définir la vitesse volumique d'apparition d'un produit.

2. À partir du graphique représentant la concentration en quantité de matière du produit en fonction du temps, expliquer comment déterminer graphiquement la vitesse volumique d'apparition du produit à un instant donné.

3. À partir des valeurs des concentrations en quantité de matière du produit à différents instants t_i, expliquer comment déterminer à l'aide d'un langage de programmation la vitesse volumique d'apparition du produit en un point ?

16 Eau oxygénée et ions iodure

L'eau oxygénée peut se décomposer lentement en présence d'ions iodure selon la réaction d'équation :

$$H_2O_2\,(aq) + 2\,I^-\,(aq) + 2\,H_3O^+\,(aq) \rightarrow I_2\,(aq) + 4\,H_2O\,(\ell)$$

Par spectrophotométrie, on détermine la concentration en quantité de matière du diiode formé au cours du temps, voici les résultats :

t (en s)	0	126	434	682	930
$[I_2]$ (en mmol · L^{-1})	0,00	1,74	4,06	5,16	5,84

1. Calculer la vitesse volumique d'apparition du diiode aux instants $t_2 = 126$ s et $t_4 = 682$ s.
2. Comparer ces deux vitesses.

17 Temps de demi-réaction

1. Définir le temps de demi-réaction.
2. Parmi les relations suivantes, laquelle (ou lesquelles) correspond(ent) au(x) temps de demi-réaction ? Justifier chacune des réponses.

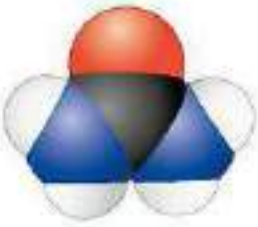
a. $t_{1/2} = \dfrac{x_f}{2}$ b. $x_{1/2} = \dfrac{t_f}{2}$ c. $x(t_{1/2}) = \dfrac{x_{max}}{2}$

d. $x(t_{1/2}) = \dfrac{x_f}{2}$ e. $x(t_{1/2}) = \dfrac{n_i(\text{réactif limitant})}{2}$

3. En s'aidant éventuellement d'un graphique, représenter comment déterminer le temps de demi-réaction d'après la (ou les) relation(s) sélectionnée(s).

18 L'urée

1. Qu'est-ce qu'une réaction d'ordre 1 par rapport à un réactif A ?
2. L'urée est une molécule provenant de la dégradation des protéines par le foie, découverte en 1773 par le chimiste français Hilaire-Marin Rouelle.





En milieu neutre, elle peut se transformer en isocyanate d'ammonium selon la réaction lente d'équation :

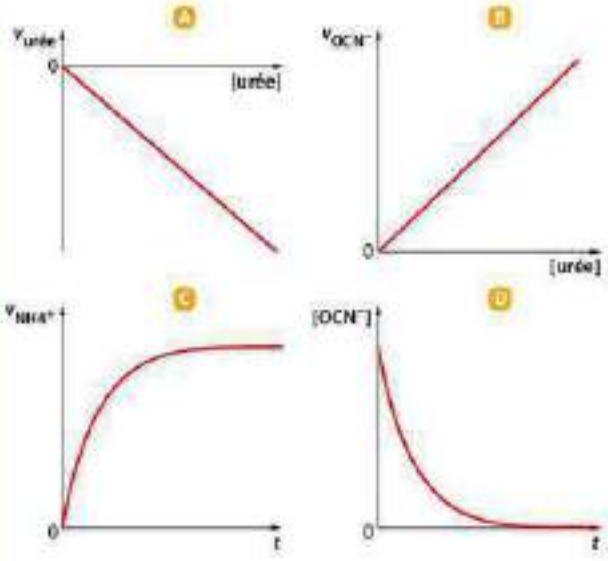
$$OC(NH_2)_2\,(aq) \rightarrow OCN^-\,(aq) + NH_4^+\,(aq)$$

a. Cette réaction étant d'ordre 1, exprimer les vitesses volumiques d'apparition des différents produits et la vitesse volumique de disparition de l'urée. On utilisera des notations explicites.

b. Parmi les graphiques ci-après, lequel (ou lesquels) :
- est (sont) juste(s) ?
- est (sont) faux ?

Justifier chaque réponse.

c. Corriger celui (ou ceux) qui est (sont) faux en modifiant uniquement la grandeur représentée en ordonnées.



3 Modélisation microscopique

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Mécanisme réactionnel, formalisme de la flèche courbe

- À partir d'un mécanisme réactionnel fourni, identifier un intermédiaire réactionnel, un catalyseur et établir l'équation de la réaction qu'il modélise au niveau microscopique.
- Représenter les flèches courbes d'un acte élémentaire, en justifiant leur sens.

Acquérir les bases : 22 S'entraîner : 26 33

Facteurs cinétiques

- Interpréter l'influence des concentrations et de la température sur la vitesse d'un acte élémentaire, en termes de fréquence et d'efficacité des chocs entre entités.

Acquérir les bases : 22 S'entraîner : 29

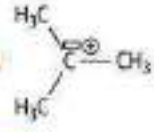
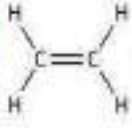
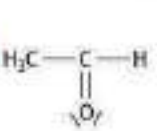
DONNÉES

- Électronégativités comparées χ de quelques éléments : $\chi(O) > \chi(C)$; $\chi(C) = \chi(H)$.

19 Sites donneurs et sites accepteurs

Pour chaque entité chimique, identifier les sites donneurs et les sites accepteurs de doublet d'électrons. Justifier chaque réponse.

a. $\left[\overline{\underline{Cl}}\right]^{\ominus}$ b. $[H]^{\oplus}$ c. $H_3C-CH_2-\overline{\underline{O}}-H$

d.  e.  f. 

20 Flèche courbe

Une réaction élémentaire est représentée en utilisant le modèle de la flèche courbe. Parmi les propositions suivantes, laquelle (ou lesquelles) est(sont) juste(s) ? Expliquer pourquoi les autres sont fausses.

a. 

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

b. $H^{\oplus} + Cl^{\ominus} \longrightarrow H-Cl$

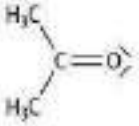
c. $H^{\oplus} + Cl^{\ominus} \longrightarrow H-Cl$

d. $Cl^{\ominus} + H^{\oplus} \longrightarrow H-Cl$

e. $H^{\oplus} + Cl^{\ominus} \longrightarrow H-Cl$

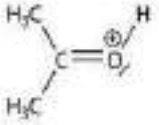
f. $Cl^{\ominus} + H^{\oplus} \longrightarrow H-Cl$

21 Réaction élémentaire



1. Dans la molécule de propanone dont la formule est donnée ci-contre, identifier le site donneur et le site accepteur de doublet d'électrons. Justifier la réponse.

2. Quand on met cette molécule en présence d'un ion hydrogène H^+, lequel des sites précédemment identifié est actif ? Justifier la réponse.



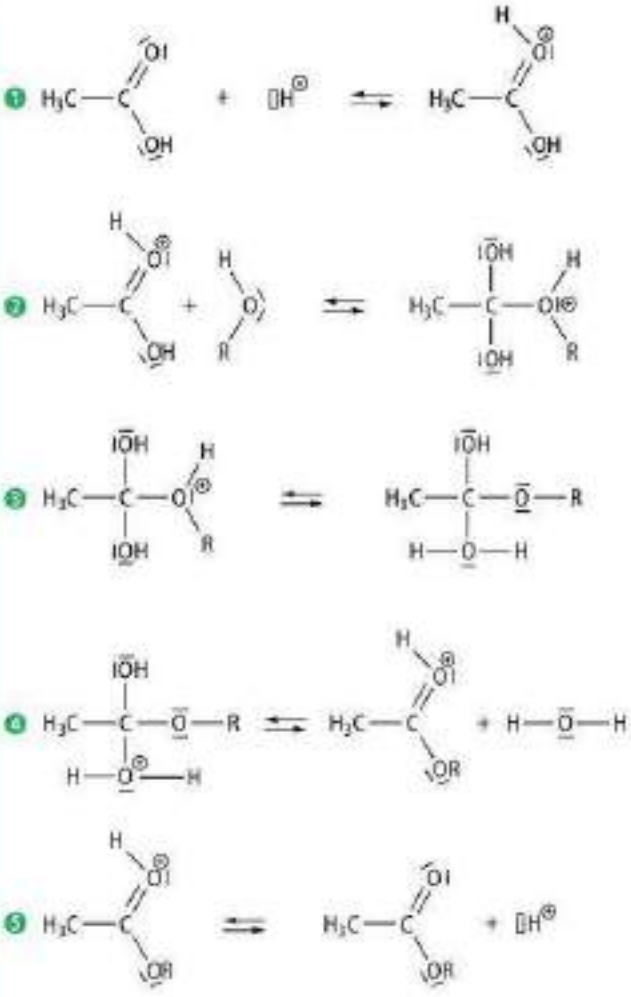
3. a. Écrire l'équation de la réaction élémentaire entre la propanone et l'ion hydrogène permettant d'obtenir l'intermédiaire réactionnel dont la formule est donnée ci-contre.

b. Représenter par une flèche courbe le déplacement d'électrons rendant compte de la nouvelle liaison formée.

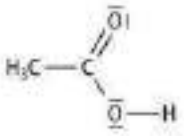
22 Mécanisme réactionnel

1. Dans un mécanisme réactionnel, comment reconnaître :
a. un intermédiaire réactionnel ?
b. un catalyseur ?

2. On donne le mécanisme réactionnel ci-après modélisant une transformation chimique.
a. Copier la formule de chaque entité chimique intervenant dans ce mécanisme et la qualifier en utilisant un terme parmi cette liste : *réactif – produit – intermédiaire réactionnel – catalyseur*. Justifier la réponse.
b. Écrire l'équation de la réaction modélisée par ce mécanisme.



c. Expliquer l'influence d'une augmentation de la température ou de la concentration de l'espèce ci-contre, de R—OH et de l'ion H^+ sur le déroulement de ce mécanisme ?



3. Recopier le mécanisme et ajouter les flèches courbes manquantes.

Faire le point avant d'aller plus loin

PRÉPA BAC

Pour vérifier ses connaissances, répondre aux questions suivantes (sans regarder le cours !)

- Expliquer ce qu'est un facteur cinétique, puis en citer deux.
- Expliquer l'action des facteurs cinétiques d'un point de vue microscopique.
- Définir la vitesse volumique d'apparition d'un produit.
- Expliquer le modèle de la flèche courbe.
- Définir un site donneur et un site accepteur de doublet d'électrons.
- Pour la réaction $A \rightarrow B + C$ d'ordre 1, donner deux expressions de la vitesse volumique de disparition du réactif.
- Définir le temps de demi-réaction et expliquer comment le déterminer graphiquement.
- Définir un catalyseur et expliquer comment l'identifier dans un mécanisme réactionnel.

Retrouver ces questions en version numérique

Exercice résolu EN AUTONOMIE



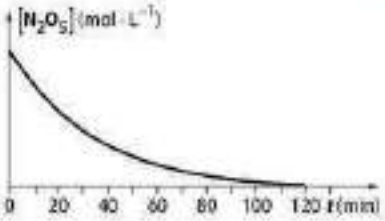
23 Décomposition du pentaoxyde de diazote

Le dioxyde d'azote NO_2 est un gaz roux, l'un des principaux polluants atmosphériques.

Il peut être obtenu par la réaction d'ordre 1 d'équation :

$$2\,N_2O_5\,(g) \rightarrow 4\,NO_2\,(g) + O_2\,(g)$$

Dans une enceinte de volume constant maintenue à 50 °C, on introduit du pentaoxyde de diazote N_2O_5 et on suit sa décomposition avec un manomètre. On en déduit la concentration en N_2O_5 au cours du temps, représentée sur le graphique ci-dessous.



1. **Justifier** le choix du capteur utilisé.

2. a. **Définir** le temps de demi-réaction.

b. Le **déterminer** graphiquement.

c. **Représenter l'allure** de la concentration en N_2O_5 au cours du temps à 100 °C. Justifier cette allure.

3. **Représenter l'allure** de la vitesse volumique de disparition du N_2O_5 en fonction de sa concentration en quantité de matière. Justifier.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- **L'ordre d'une réaction** indique une relation entre la vitesse de disparition d'un réactif ou d'apparition d'un produit et la concentration en quantité de matière des réactifs.
- La **nature des réactifs** et des produits indique un moyen de suivi approprié à la transformation.

LES VERBES D'ACTION

- **Justifier** : énoncer un argument.
- **Définir** : énoncer une définition.
- **Déterminer** : mettre en œuvre une stratégie pour trouver un résultat.
- **Représenter l'allure** : tracer un graphique simplifié.

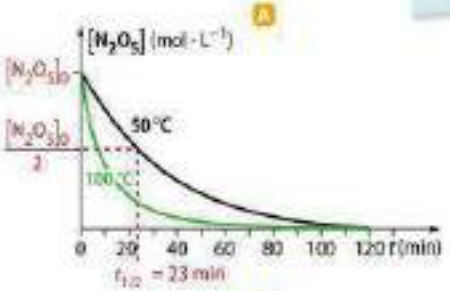
EXEMPLE DE RÉDACTION

1. La réaction étudiée met en jeu des gaz, on peut suivre son évolution par mesure de pression.

2. a. Le temps de demi-réaction est la durée au bout de laquelle l'avancement de la réaction vaut la moitié de l'avancement final.

b. et **c.** Ici, le réactif limitant est entièrement consommé en fin de réaction, donc le temps de demi-réaction est l'abscisse du point d'ordonnée $\frac{[N_2O_5]_0}{2}$ soit environ **23 min**.

La température est un facteur cinétique, donc à 100 °C, l'état final sera atteint plus rapidement qu'à 50 °C A.





3. La réaction étudiée étant d'ordre 1, la vitesse volumique de disparition du N_2O_5 est proportionnelle à sa concentration en quantité de matière, donc on obtient une droite passant par l'origine B.

QUELQUES CONSEILS

2. et **3.** Pour représenter l'allure d'un graphique, on doit soigner ses éléments essentiels : sa forme et les quelques points particuliers qui peuvent être connus tels que la valeur initiale, la valeur finale, ou autre.

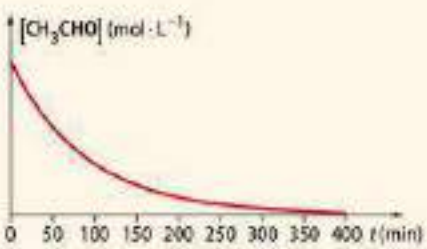
EXERCICE SIMILAIRE

24 Décomposition de l'éthanal

L'éthanal, naturellement produit par les plantes, a une odeur de pomme verte. Il peut se décomposer à haute température suivant la réaction d'ordre 1 d'équation :

$$CH_3CHO\,(g) \rightarrow CH_4\,(g) + CO\,(g)$$

Dans une enceinte de volume constant maintenue à 477 °C, on utilise un manomètre pour suivre cette réaction. On en déduit l'évolution de la concentration en quantité de matière d'éthanal en fonction du temps (voir ci-contre).

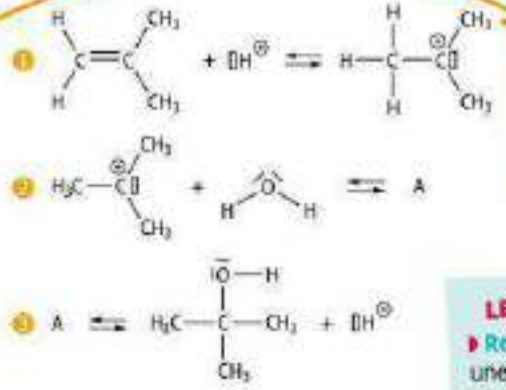


1. Justifier le choix du capteur utilisé.
2. Après avoir défini le temps de demi-réaction, le déterminer graphiquement.
3. Représenter l'allure de la concentration en éthanal en fonction du temps à 400 °C. Justifier.
4. Représenter l'allure de la vitesse volumique de disparition de l'éthanal en fonction de sa concentration en quantité de matière. Justifier.

Exercice résolu EN AUTONOMIE

25 Synthèse du 2-méthylpropan-2-ol

Le 2-méthylpropan-2-ol est synthétisé industriellement à partir de l'isobutène.
Le mécanisme réactionnel modélisant cette transformation est donné ci-contre.



1. Retrouver l'équation de la réaction modélisée par le mécanisme réactionnel donné.
2. Identifier le site donneur et le site accepteur de doublet d'électrons lors de l'étape 1.
3. Recopier l'étape 2 du mécanisme.
a. Représenter la (ou les) flèche(s) courbe(s) manquante(s).
b. Déterminer la formule de l'espèce chimique A.
4. Donner la formule de tous les intermédiaires réactionnels intervenant dans ce mécanisme.
5. Que dire de l'ion hydrogène H^+ ? Justifier la réponse.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

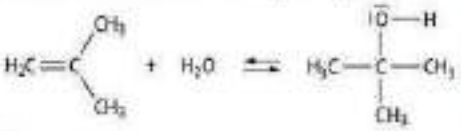
- Le **mécanisme réactionnel** d'une transformation permet d'identifier les intermédiaires réactionnels et le catalyseur éventuel.

LES VERBES D'ACTION

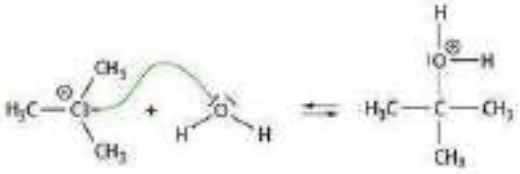
- Retrouver : mettre en œuvre une stratégie pour trouver un résultat.
- Identifier : localiser à l'aide d'une définition.
- Déterminer : mettre en œuvre une stratégie pour trouver un résultat.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. La réaction modélisée a pour équation :



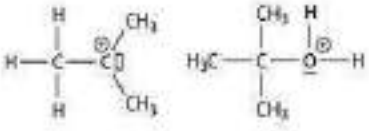
Étape 1 :



2. La double liaison **C=C est un site donneur** de doublet d'électrons et l'ion **H^+ est un site accepteur** de doublet d'électrons.

3. a. et b. Voir l'étape 2 du mécanisme complétée.
Le doublet non liant de l'oxygène devient liant entre le carbone et l'oxygène.

4. Les intermédiaires réactionnels sont les espèces produites lors des étapes 1 et 2, puis consommées lors d'une étape ultérieure. Elles ont pour formule :



5. L'**ion hydrogène** est consommé à l'étape 1 et régénéré à l'étape 3, c'est un **catalyseur**.

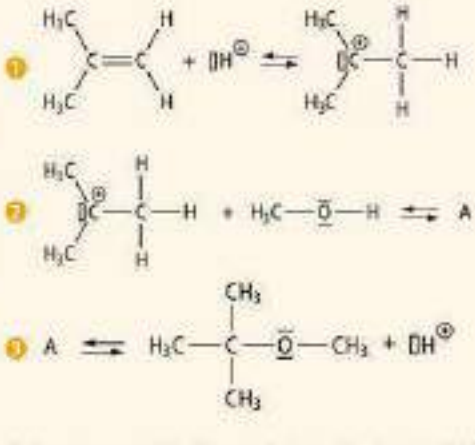
QUELQUES CONSEILS

1. Établir le bilan de la réaction en ne faisant figurer que les réactifs et les produits.
3. La flèche courbe modélise le déplacement d'un doublet d'électrons. Un doublet non liant peut devenir liant ou inversement.

EXERCICE SIMILAIRE

26 Synthèse du MTBE

Le méthyl tert-butyl éther ou MTBE permet d'augmenter l'indice d'octane de l'essence. Il est synthétisé par une réaction modélisée par le mécanisme ci-contre.



1. Retrouver l'équation de la réaction modélisée par le mécanisme réactionnel fourni.
2. Identifier les sites donneurs et les sites accepteurs de doublet d'électrons lors des étapes 1 et 2.
3. Recopier les trois étapes du mécanisme, puis représenter les flèches courbes rendant compte des déplacements de doublets d'électrons et déterminer la formule de l'espèce A.
4. Donner la formule de tous les intermédiaires réactionnels intervenant dans ce mécanisme.
5. Que dire de l'ion hydrogène H^+ ? Justifier la réponse.

S'entraîner pour maîtriser

SAVOIR RÉDIGER

27 Proposer une correction de la solution donnée par un élève à l'énoncé

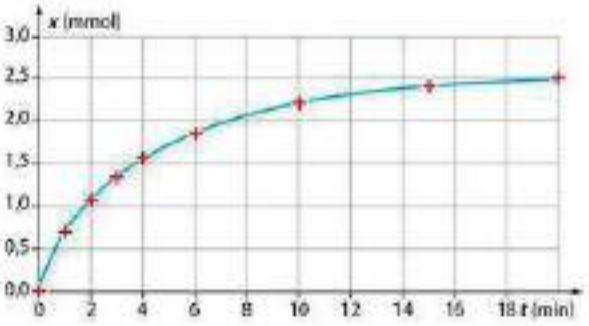
Énoncé

On suit l'évolution de la transformation du propan-2-ol en propanone par les ions permanganate selon la réaction d'équation :

$$5\,C_3H_8O\,(aq) + 2\,MnO_4^-\,(aq) + 6\,H^+\,(aq) \rightarrow 5\,C_3H_6O\,(aq) + 2\,Mn^{2+}\,(aq) + 8\,H_2O\,(\ell)$$

Le volume V du milieu réactionnel est constant.

L'avancement de la réaction au cours du temps est donné par le graphique ci-contre.



1. a. Établir le lien entre la concentration en quantité de matière de propanone $[C_3H_6O\,(aq)]$ et l'avancement x de la réaction.

b. Établir l'expression de la vitesse volumique d'apparition de la propanone en fonction de l'avancement.

2. a. Comment évolue qualitativement la vitesse volumique d'apparition de la propanone ? Justifier la réponse.

b. Quel facteur cinétique est à l'origine de cette évolution ?

3. Définir le temps de demi-réaction et le déterminer graphiquement.

Solution proposée par un élève

1. a. On a : $n(C_3H_6O) = x$ donc $[C_3H_6O\,(aq)] = \dfrac{n(C_3H_6O)}{V} = \dfrac{x}{V}$) Ne pas oublier le nombre stœchiométrique.

b. On a : $v_{C_3H_6O} = \dfrac{d[C_3H_6O\,(aq)]}{dt} = \dfrac{d\left(\frac{x}{V}\right)}{dt}$.) Cette expression peut être simplifiée

2. a. La vitesse volumique d'apparition de la propanone diminue au cours du temps.) Justifier en s'aidant du graphique

b. Au cours de la réaction, il y a de moins en moins de réactifs.

La concentration des réactifs est le facteur cinétique expliquant cette évolution.

3. On a : $t_{1/2} = \dfrac{x_f}{2}$. D'après le graphique, $t_{1/2}$ vaut environ 2,8 minutes.) Cette expression n'est pas homogène

28 Roches calcaires



Le carbonate de calcium $CaCO_3$ présent dans les roches calcaires peut réagir en présence d'eau acide pour former du dioxyde de carbone selon la réaction d'équation :

$$CaCO_3\,(s) + 2\,H_3O^+\,(aq) \rightarrow Ca^{2+}\,(aq) + CO_2\,(g) + 3\,H_2O\,(\ell)$$

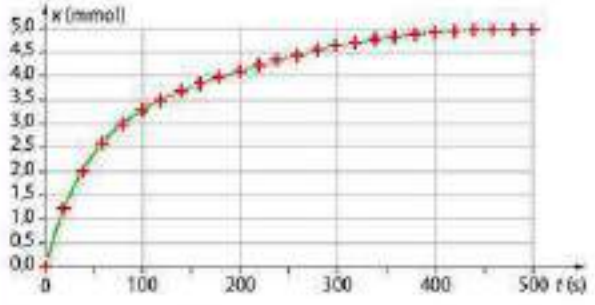
On étudie cette transformation en mélangeant de l'acide chlorhydrique et du carbonate de calcium à 20 °C.

Soit V le volume réactionnel, considéré constant.

1. a. En s'aidant éventuellement d'un tableau d'avancement, établir la relation entre la quantité de matière d'ions oxonium $n(H_3O^+)$, la quantité de matière initiale d'ions oxonium $n_0(H_3O^+)$ et l'avancement x de la transformation.

b. Établir la relation entre la vitesse volumique de disparition de l'ion oxonium H_3O^+ et l'avancement de la réaction.

2. L'avancement de la réaction au cours du temps est donné par ce graphique :



a. Sans faire de calcul et en s'aidant du graphique, déterminer comment évolue la vitesse volumique de disparition de l'ion oxonium. Justifier la réponse.

b. Représenter l'allure de l'avancement de la réaction en fonction du temps à 50 °C et à 0 °C.

c. Expliquer l'influence de la température au niveau microscopique.

3. a. Définir le temps de demi-réaction.

b. Déterminer sa valeur à 20 °C.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

JE VÉRIFIE QUE J'AI...

- exprimé correctement la vitesse volumique de disparition du réactif ;
- représenté correctement l'asymptote des courbes représentant l'avancement en fonction du temps.

29 Eau oxygénée et ions tartrate

L'eau oxygénée H_2O_2 peut réagir avec les ions tartrate $C_4H_4O_6^{2-}$ selon la réaction d'équation :

$$5\,H_2O_2\,(aq) + C_4H_4O_6^{2-}\,(aq) + 2\,H_3O^+\,(aq) \rightarrow 4\,CO_2\,(g) + 10\,H_2O\,(\ell)$$

Pour réaliser cette transformation, on mélange de l'eau oxygénée, des ions tartrate et quelques gouttes d'acide sulfurique concentré.

Données : *en solution, les ions Co^{2+} sont verdâtres et les ions Co^{3+} sont roses.*

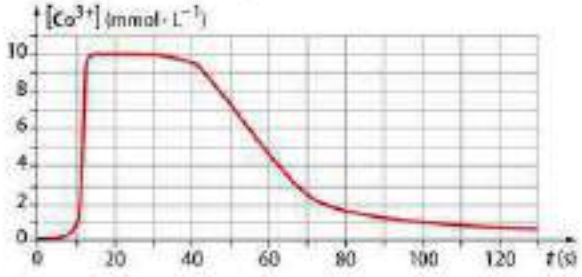
1. Quel est le rôle de l'acide sulfurique concentré.

2. En présence d'ions cobalt (II) Co^{2+}, cette réaction, extrêmement lente, peut être décomposée en deux réactions rapides d'équations :

$$5\,H_2O_2\,(aq) + 10\,H_3O^+\,(aq) + 10\,Co^{2+}\,(aq) \rightarrow 10\,Co^{3+}\,(aq) + 20\,H_2O\,(\ell) \quad \textbf{(1)}$$

$$C_4H_4O_6^{2-}\,(aq) + 10\,Co^{3+}\,(aq) + 10\,H_2O\,(\ell) \rightarrow 8\,H_3O^+\,(aq) + 4\,CO_2\,(g) + 10\,Co^{2+}\,(aq) \quad \textbf{(2)}$$

L'évolution de la concentration en quantité de matière des ions cobalt (III) Co^{3+} est représentée ci-dessous.



a. Établir le bilan des réactions **1** et **2**.
b. Quel est le rôle des ions Co^{2+} ? Justifier la réponse.
c. Interpréter la courbe obtenue. Que dire des ions Co^{3+} ?
d. Quelle est la couleur de la solution entre la 10e et la 80e seconde ? Justifier la réponse.
e. Quelle est la couleur de la solution les 10 premières secondes et à partir de la 80e seconde ?
f. Justifier que l'on puisse suivre l'évolution de la concentration en quantité de matière des ions Co^{3+} à l'aide d'un spectrophotomètre. Expliquer comment régler le spectrophotomètre pour cette étude.

Coups de pouce

- Un intermédiaire réactionnel est formé, puis consommé.
- Un catalyseur est consommé puis régénéré.

30 Calculer et représenter

On considère cette réaction schématique A + B → D + E.

1. Parmi les instructions suivantes, laquelle permet de :
a. calculer la concentration de A ?
b. tracer l'évolution temporelle de la concentration de A ?
c. calculer la vitesse volumique d'apparition de D ?

❶
```
VD = []
for i in range(1, len(CD)-1) :
VD.append((CD[i+1]-CD[i-1])/(t[i+1]-t[i-1]))
```

❷
```
CA0 = 0.001
CA = []
for i in range (0,len(CD)) :
CA.append(CA0-CD[i])
```

❸
```
plt.plot(t,CA,'r+-')
```

2. Proposer une instruction rédigée à l'aide d'un langage de programmation permettant de représenter la vitesse volumique d'apparition de D en fonction de la concentration de A.

31 Dismutation de l'eau oxygénée

DÉMARCHES DIFFÉRENCIÉES

La réaction de dismutation de l'eau oxygénée a pour équation : $2\,H_2O_2\,(aq) \rightarrow 2\,H_2O\,(\ell) + O_2\,(g)$

On suit l'évolution de cette transformation en dosant à différents instants l'eau oxygénée restant dans le milieu.

On obtient les résultats suivants :

t (en min)	0	10	20	30	40
$[H_2O_2]$ (en mol · L^{-1})	0,80	0,52	0,34	0,22	0,14

t (en min)	50	60	70	80	90
$[H_2O_2]$ (en mol · L^{-1})	0,091	0,059	0,038	0,025	0,016

DÉMARCHE EXPERTE

À l'aide d'un langage de programmation, déterminer s'il s'agit d'une réaction d'ordre 1.

DÉMARCHE AVANCÉE

1. À l'aide d'un langage de programmation, calculer la vitesse volumique de disparition de l'eau oxygénée pour chaque instant entre $t = 10$ min et $t = 80$ min.
2. Tracer le graphique représentant cette vitesse volumique en fonction de la concentration en eau oxygénée pour les instants $t = 10$ min à $t = 80$ min.
3. Utiliser une modélisation adaptée pour déterminer s'il s'agit d'une réaction d'ordre 1.

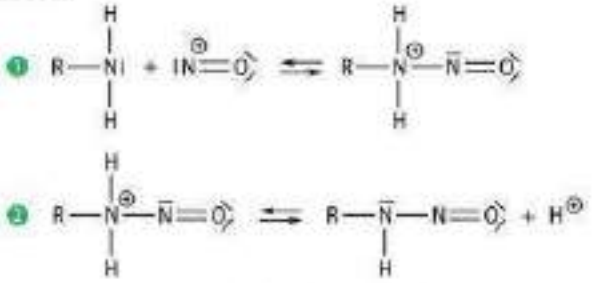
32 Le rouge para

HISTOIRE DES SCIENCES

Le rouge para est un colorant découvert en 1880 par von Gallois et Ullrich. Il servait autrefois notamment à teindre les torchons de cuisine, mais c'est un colorant qui résiste mal au temps.



Le rouge para peut être synthétisé à partir de la 4-nitroaniline selon un mécanisme dont les deux premières étapes sont :



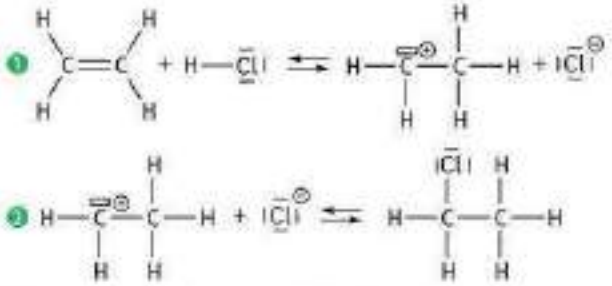
Recopier les deux premières étapes du mécanisme et représenter les flèches courbes manquantes en justifiant leur sens.

33 Chloroethane

Formerly used in the manufacture of leaded petrol, chloroethane can be used as a local anaesthetic.



It is synthesised at high temperature according to the following mechanism:



Data: *comparative electronegativities of some elements:* $\chi(Cl) > \chi(C) \approx \chi(H)$.

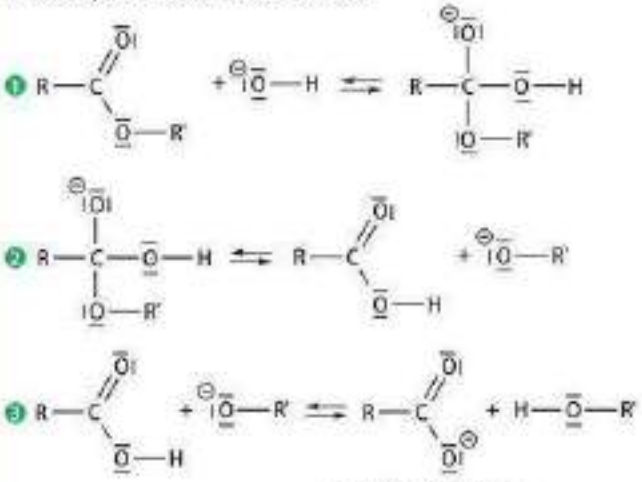
1. Copy the reaction mechanism and add all the missing curved arrows, justifying their direction.
2. Give the formula of all reaction intermediates involved in this mechanism.
3. Establish the equation for the reaction model.

34 Savon de Marseille®



L'huile d'olive sert de matière première au savon de Marseille®. Pour simplifier les écritures, la molécule contenue dans l'huile d'olive sera notée RCOOR'.

La formation de savon à partir d'huile d'olive peut être schématisée par le mécanisme suivant :



constituant du savon

1. Recopier les trois étapes de ce mécanisme et représenter les flèches courbes manquantes.
2. Justifier le sens des flèches courbes sur les étapes ❶ et ❸.
3. Donner la formule de tous les intermédiaires réactionnels apparaissant dans ce mécanisme.
4. Établir l'équation de la réaction modélisée par ce mécanisme réactionnel.

Données : *électronégativités comparées χ de quelques éléments :* $\chi(O) > \chi(C) \approx \chi(H)$.

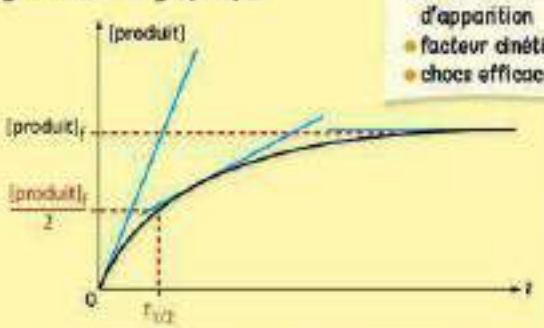
JE VÉRIFIE QUE J'AI...

- orienté correctement les flèches courbes ;
- fait figurer dans le bilan de la réaction uniquement les réactifs et les produits, et pas les intermédiaires réactionnels.

À L'ORAL

35 Suivi d'une transformation

Préparer un exposé oral permettant d'expliquer tous les éléments figurant sur ce graphique.



Les mots-clés à utiliser

- temps de demi-réaction
- vitesse volumique d'apparition
- facteur cinétique
- chocs efficaces

Ce court exposé devra pouvoir être réalisé sans note écrite.

36 RETOUR SUR LA PAGE D'OUVERTURE

La formation de la rouille est une transformation chimique extrêmement lente.

Préparer un exposé oral expliquant comment caractériser et modifier la durée d'une transformation chimique.



Développer ses compétences

37 L'éthanoate de butyle

ANALYSE ET SYNTHÈSE DE DOCUMENTS

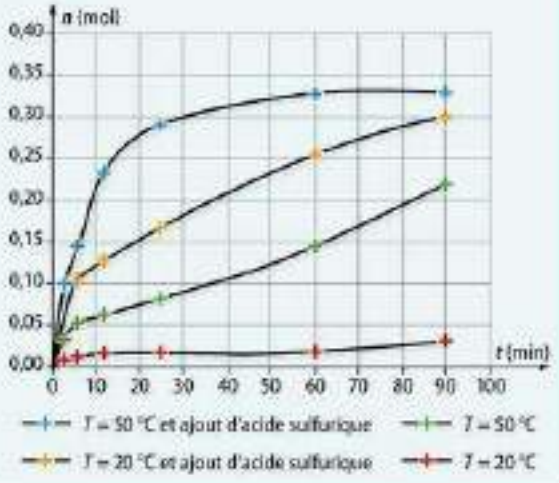
60 min

APP Rechercher et organiser l'information

L'éthanoate de butyle $C_6H_{12}O_2$ peut se trouver à l'état naturel dans certains fruits ou être synthétisé en laboratoire. Il est utilisé comme additif alimentaire dans les sucreries.

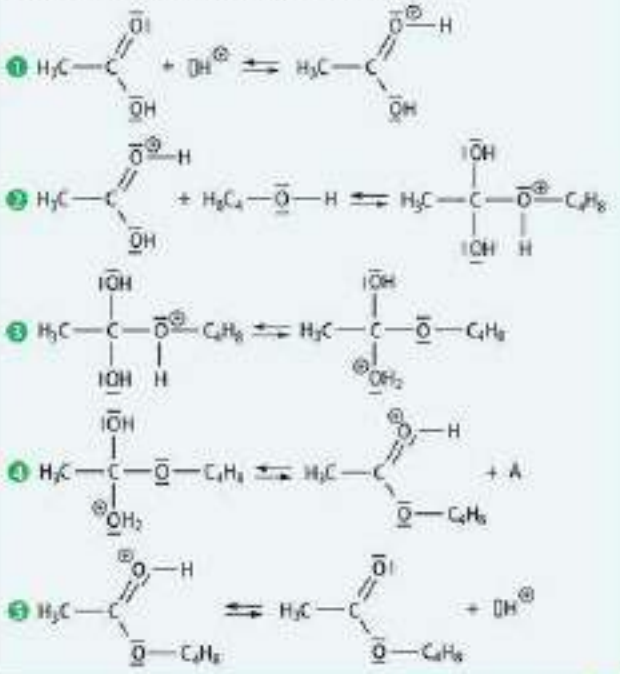
DOC 1 Synthèse de l'éthanoate de butyle

On a synthétisé l'éthanoate de butyle dans plusieurs conditions opératoires. Voici la quantité d'éthanoate de butyle formé au cours du temps dans ces conditions :



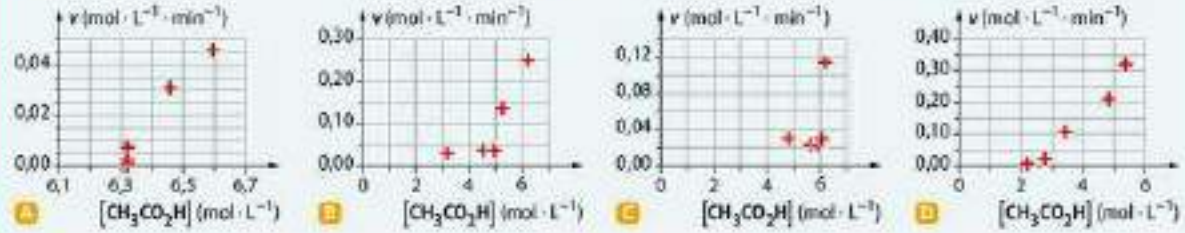
DOC 2 Mécanisme réactionnel

La synthèse de l'éthanoate de butyle peut être décomposée selon le mécanisme réactionnel suivant.



DOC 3 Vitesse volumique d'apparition de l'éthanoate de butyle

Les graphiques ci-dessous représentent la vitesse volumique d'apparition de l'éthanoate de butyle v en fonction de la concentration du réactif CH_3CO_2H dans différentes conditions :
A à 20 °C ; B à 20 °C avec ajout d'acide sulfurique ; C à 50 °C ; D à 50 °C avec ajout d'acide sulfurique.



ANALYSE

1. a. Justifier le rôle de chaque paramètre (doc. 1).
   b. Représenter l'allure de la quantité de matière d'éthanoate de butyle formé au cours du temps à une température de 90 °C avec ajout d'acide sulfurique.
2. Définir le temps de demi-réaction, puis le déterminer pour la synthèse menée à 50 °C avec ajout d'acide sulfurique.
3. a. Recopier le mécanisme réactionnel et le compléter avec les flèches courbes manquantes. Quelle est l'espèce A ?
   b. Quel est le rôle des ions H^+ ? Comment sont-ils apportés ?
4. Établir l'équation de la réaction de synthèse de l'éthanoate de butyle $C_6H_{12}O_2$.
5. a. Définir la vitesse volumique d'apparition de l'éthanoate de butyle.
   b. Que dire de l'ordre de cette réaction ? Justifier la réponse.

SYNTHÈSE

Présenter en une dizaine de lignes la réaction de synthèse de l'éthanoate de butyle.

À la date de publication de ce manuel, certaines notions enseignées dans ce chapitre sont exclues de l'épreuve écrite.

38 Le 2-chloro-2-méthylpropane

RÉSOLUTION DE PROBLÈMES

80 min

ANALYSER Proposer une stratégie de résolution

L'hydrolyse du 2-chloro-2-méthylpropane peut être suivie par conductimétrie.

DOC 1 Protocole expérimental

- Dans une fiole jaugée de 25,0 mL on introduit 1,0 mL de 2-chloro-2-méthylpropane, puis on complète la fiole avec de l'acétone (propanone) jusqu'au trait de jauge. Soit S la solution obtenue.
- Dans un bécher contenant 200,0 mL d'eau distillée, on verse 5,0 mL de la solution S.
- On relève la conductivité du mélange au cours du temps.



Données :

• 2-chloro-2-méthylpropane :
masse molaire M = 92,0 g · mol⁻¹ ;
masse volumique ρ = 0,85 g · mL⁻¹.

• Loi de Kohlrausch :
La conductivité d'une solution peut se calculer d'après la relation :

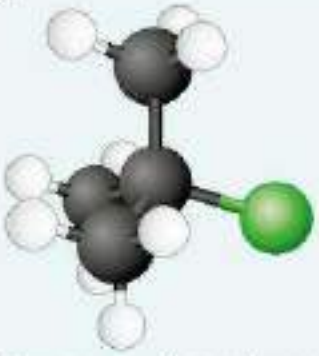
$$\sigma_{solution} = \sum_i \lambda_i \cdot [X_i]$$

avec λ_i la conductivité molaire ionique et $[X_i]$ la concentration en quantité de matière des ions présents en solution, exprimée en mol · m⁻³.

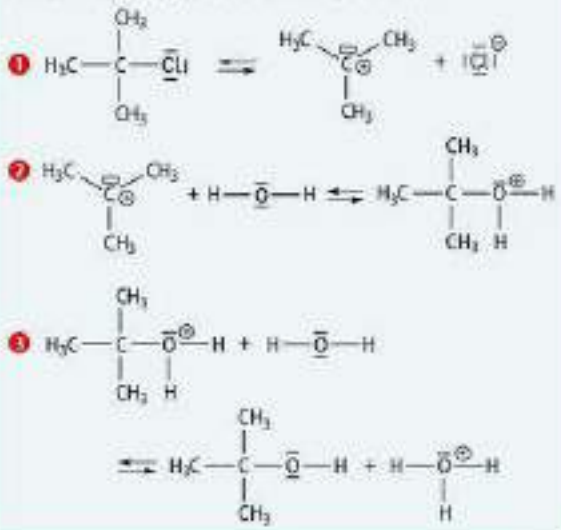
• Conductivités molaires ioniques à 25 °C :
$\lambda_{H_3O^+} = 349{,}8 \times 10^{-4}$ S · m² · mol⁻¹ ;
$\lambda_{Cl^-} = 76{,}3 \times 10^{-4}$ S · m² · mol⁻¹.

DOC 2 Mécanisme réactionnel

Le 2-chloro-2-méthylpropane a pour formule $(CH_3)_3C—Cl$.



Il peut s'hydrolyser, c'est-à-dire réagir avec l'eau, pour former un alcool. Si cette réaction est d'ordre 1 par rapport au 2-chloro-2-méthylpropane, elle peut être modélisée par le mécanisme suivant.



DOC 3 Valeurs expérimentales

Les tableaux ci-dessous donnent les valeurs de la conductivité de la solution, mesurée au cours du temps.

t (en min)	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
σ (en S · m⁻¹)	0,00	0,0935	0,164	0,218	0,258	0,312	0,343	0,360	0,371

t (en min)	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0
σ (en S · m⁻¹)	0,376	0,380	0,382	0,383	0,383	0,384	0,384	0,384	0,384

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Recopier le mécanisme réactionnel proposé et le compléter avec les flèches courbes manquantes en justifiant leur sens.
2. Établir le bilan de la réaction entre le 2-chloro-2-méthylpropane et l'eau.

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

Déterminer si la réaction d'hydrolyse du 2-chloro-2-méthylpropane est d'ordre 1.

Il est attendu une prise d'initiatives et une présentation de la démarche suivie même s'il elle n'a pas abouti, et de justifier toute réponse.

39 Dimérisation du butadiène

ANALYSE ET SYNTHÈSE DE DOCUMENTS

30 min

APP Rechercher et organiser l'information

Le butadiène peut se transformer en vinylcyclohexène à haute température.

DOC 1 Du butadiène au vinylcyclohexène

En phase gazeuse, le butadiène noté B se transforme en vinylcyclohexène noté V selon une réaction d'équation :

$$2\,B\,(g) \rightarrow V\,(g)$$

Cette réaction est appelée dimérisation.



Butadiène : B

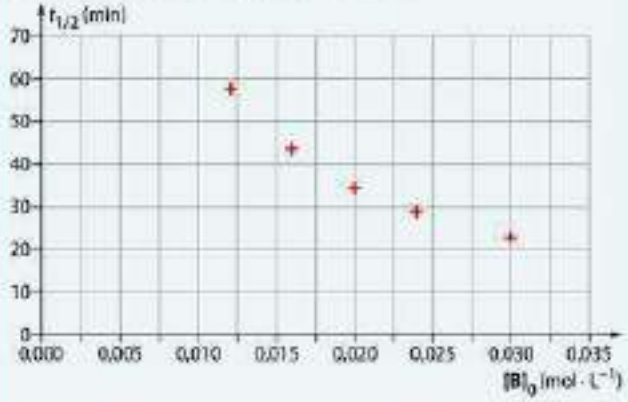


Vinylcyclohexène : V

DOC 2 Temps de demi-réaction

On suit par manométrie la réaction de dimérisation du butadiène à 330 °C dans une enceinte de volume constant, pour différentes concentrations initiales en quantité de matière de butadiène.

Pour chaque valeur de concentration initiale en butadiène, on détermine le temps de demi-réaction. Les valeurs sont reportées dans le graphique ci-dessous.



ANALYSE

1. Justifier le choix du capteur pour le suivi de la dimérisation du butadiène.
2. a. Rappeler la définition du temps de demi-réaction.
   b. Comment évolue la durée d'une transformation chimique en fonction de son temps de demi-réaction ?

SYNTHÈSE

En analysant le graphique du document 2, identifier le facteur cinétique mis en évidence et expliquer son rôle au niveau microscopique.

VERS LE SUP'

40 Expression de la concentration en fonction du temps

Une équation différentielle est une équation reliant une fonction à ses dérivées.

Pour résoudre une équation différentielle, on peut procéder à une séparation des variables qui consiste à regrouper chaque variable dans un même membre de l'égalité.

Par exemple, l'équation différentielle $\frac{dy}{dt} = k \cdot y$ relie la fonction y à sa dérivée par rapport au temps. Pour la résoudre, la séparation des variables consiste à réécrire l'équation de la manière suivante : $\frac{dy}{y} = k \cdot dt$.

La variable y se retrouve dans le membre de gauche de l'égalité et la variable t dans le membre de droite.

On considère une réaction totale d'ordre 1 d'équation schématique : A → B.

1. Donner deux expressions de la vitesse volumique de disparition de A.
2. Établir l'équation différentielle vérifiée par la concentration en A.
3. En procédant à une séparation des variables, établir l'expression de la concentration en quantité de matière de A en fonction du temps.
4. a. En partant de sa définition, établir l'expression du temps de demi-réaction.
   b. Proposer une méthode permettant de déterminer si une réaction est d'ordre 1 en utilisant le temps de demi-réaction.

Suivi conductimétrique d'une saponification

Contexte

On se propose de faire réagir de l'éthanoate d'éthyle avec de l'hydroxyde de sodium. Cette réaction, dite de saponification, est une transformation lente pouvant être suivie par conductimétrie.
Le but de cette épreuve est de suivre cette transformation et de vérifier si, dans les conditions proposées, la réaction est d'ordre 1.



Documents mis à disposition

DOC 1 **Saponification de l'éthanoate d'éthyle**

• La transformation mettant en jeu l'éthanoate d'éthyle et l'hydroxyde de sodium peut être modélisée par la réaction d'équation :

$$CH_3CO_2C_2H_5 + HO^- \rightarrow CH_3CO_2^- + C_2H_5OH$$

• Le temps de demi-réaction pour un mélange de 200 mL d'hydroxyde de sodium de concentration en quantité de matière $1{,}0 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1} et de 1 mL d'éthanoate d'éthyle vaut environ 2 min.

• La concentration en quantité de matière d'ions hydroxyde $[HO^-]$ est donnée par la relation :

$$[HO^-(aq)] = c_0 \cdot \frac{\sigma_t - \sigma_\infty}{\sigma_0 - \sigma_\infty}$$

σ_t : conductivité de la solution à un instant t
σ_∞ : conductivité de la solution lorsque la réaction est terminée
c_0 : concentration initiale en ions hydroxyde
σ_0 : conductivité de la solution à l'instant initial

Matériel mis à disposition

- Un ordinateur muni d'un logiciel de programmation
- Un conductimètre avec sa sonde
- Un agitateur magnétique avec un turbulent
- Verrerie : béchers, pipettes jaugées, fioles jaugées, éprouvettes graduées
- Une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium de concentration en quantité de matière $1{,}0 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}
- Éthanoate d'éthyle pur
- Eau distillée

Travail à effectuer

1. ANA RAI **Proposition de protocole expérimental** *(10 min conseillées)*

■ À partir des documents et du matériel disponible, proposer un protocole expérimental permettant de vérifier que le mélange de 200 mL de solution d'hydroxyde de sodium de concentration $c_0 = 1{,}0 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1} et de 1 mL d'éthanoate d'éthyle suit une réaction d'ordre 1 par rapport aux ions hydroxyde.

Être en mesure de présenter le protocole

2. REA **Mise en œuvre du protocole expérimental proposé** *(40 min conseillées)*

■ Mettre en œuvre le protocole et représenter les calcul(s) et graphique(s) nécessaires à l'aide d'un langage de programmation.

Être en mesure de présenter l'acquisition informatisée

3. VAL **Exploitation du résultat obtenu** *(10 min conseillées)*

Données : *éthanoate d'éthyle de masse molaire $M = 88$ g · mol^{-1} et de densité $d = 0{,}90$.*

1. Vérifier que dans le mélange étudié, l'éthanoate d'éthyle est en excès.

2. Un mélange d'hydroxyde de sodium avec de l'éthanoate d'éthyle en excès suit-il une réaction d'ordre 1 par rapport aux ions hydroxyde ? Justifier la réponse.

3. Relever la précision des différentes pièces de verrerie disponibles. Justifier l'usage de la verrerie employée pour préparer la solution aqueuse d'hydroxyde de sodium avec plus de précision.

Défaire le montage et ranger la paillasse.

PISTE POUR LE GRAND ORAL PRÉPA BAC

Pour se préparer à l'Oral
➥ Livret LES CLÉS DU BAC
(en début de manuel)

UNE QUESTION

Comment réduire la pollution atmosphérique due aux véhicules ?

Enjeu de la question

La combustion de l'essence conduit à la formation de gaz toxiques qui contribuent fortement à la pollution atmosphérique. Un impératif environnemental a conduit à l'installation de pots catalytiques sur tous les véhicules.

Proposition de plan de présentation

1. Combustion incomplète de l'essence : produits toxiques
2. Catalyse hétérogène : des métaux précieux à haute température
3. Amélioration de la surface de contact : structure en nid d'abeilles
4. Conclusion :
   - Limites : pollution au démarrage, émission de CO_2
   - Choix alternatifs : biocarburant, véhicule électrique

Les mots-clés

combustion incomplète ▸ dépollution ▸ catalyseur ▸ catalyse hétérogène ▸ structure alvéolaire ▸ température

Exemple de support de présentation

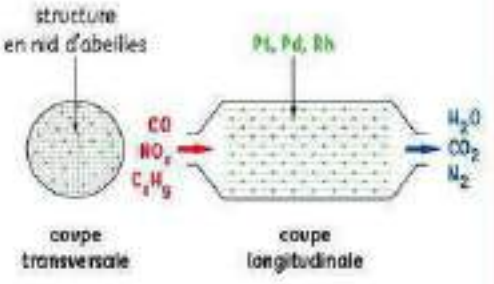


Schéma de principe d'un pot catalytique

QUESTIONS D'APPROFONDISSEMENT POSSIBLES



UN EXEMPLE DE PROJET PROFESSIONNEL

Le (la) **chercheur(euse) ou l'ingénieur(e) en R&D** (Recherche et Développement) vise à mettre au point des produits ou des procédés innovants, depuis la conception jusqu'à la mise en production, en passant par les phases de test. Il (elle) travaille en équipe avec d'autres ingénieurs/chercheurs et des techniciens. Sa recherche est appliquée à un domaine industriel précis.

Après le bac : *Bac + 5 à Bac + 8, diplôme d'ingénieur, ou licence et master suivis d'une thèse de doctorat.*

Autres métiers : *designer automobile, ingénieur(e) environnement, chercheur(euse) en physico-chimie des surfaces ou des matériaux, technicien(ne) d'essai, technicien(ne) diagnostic…*

L'industrie automobile est un secteur où la R&D a une part importante dont l'objectif est d'améliorer les modèles de véhicules existants et de concevoir de nouveaux modèles répondant à des exigences contemporaines.



Avant d'aborder le chapitre EN AUTONOMIE

LES ACQUIS INDISPENSABLES

Seconde — 1re Enseignement scientifique

- Le noyau d'un atome contient **A nucléons** : **Z protons** et **N neutrons**, avec $N = A - Z$.
Le noyau a pour symbole $^{A}_{Z}X$.



- Des noyaux **isotopes** appartiennent au même élément chimique mais leur masse est différente. Ils ont donc le même nombre de protons et des nombres de neutrons différents.
- Lors d'une **transformation nucléaire**, le cortège électronique n'est pas concerné, ce sont les noyaux des atomes qui sont modifés.
- La **radioactivité** est la désintégration spontanée d'un noyau instable. Elle a un caractère aléatoire.
- Le **temps de demi-vie** d'un noyau radioactif, noté $t_{1/2}$, est la durée nécessaire à la désintégration de la moitié des noyaux d'un échantillon radioactif, il est exprimé en seconde, année...
- La **datation** au carbone 14 est utilisée pour estimer l'âge de différents objets ou de la matière autrefois vivante.

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

Pour chaque situation, rédiger une réponse qui explique en quelques lignes le raisonnement.

SITUATION 1

Il existe deux isotopes stables de l'azote : l'azote 14 et l'azote 15, le premier représentant la quasi-totalité de l'azote présent dans la nature.

Donnée :
L'azote N a pour numéro atomique Z = 7.

Quelle différence ces deux noyaux présentent-ils ? Donner leur symbole.

SITUATION 2

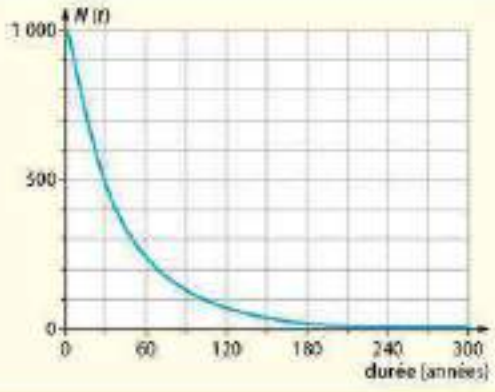
Un noyau est radioactif s'il est susceptible de se désintégrer.

Peut-on dire qu'un noyau radioactif vieillit ?

SITUATION 3

On donne ci-contre la courbe de décroissance radioactive d'un noyau.

Quelle est la valeur du temps de demi-vie de ce noyau ?



CHAPITRE

5

PHYSIQUE / CHIMIE

nucléaires



Comment les scientifiques peuvent-ils dater les ossements découverts par l'archéologue sur un chantier de fouilles ?

→ EXERCICE 31

NOTIONS ET CONTENUS

- Stabilité et instabilité des noyaux : diagramme (N, Z).
- Radioactivité α et β, équation d'une réaction nucléaire, lois de conservation.
- Radioactivité γ.
- Loi de décroissance radioactive ; temps de demi-vie ; activité.
- Radioactivité naturelle ; applications à la datation.
- Applications dans le domaine médical ; protection contre les rayonnements ionisants.

CAPACITÉ MATHÉMATIQUE

- Résoudre une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants.
  → Pour préparer l'ECE

1. ACTIVITÉ DE DÉCOUVERTE

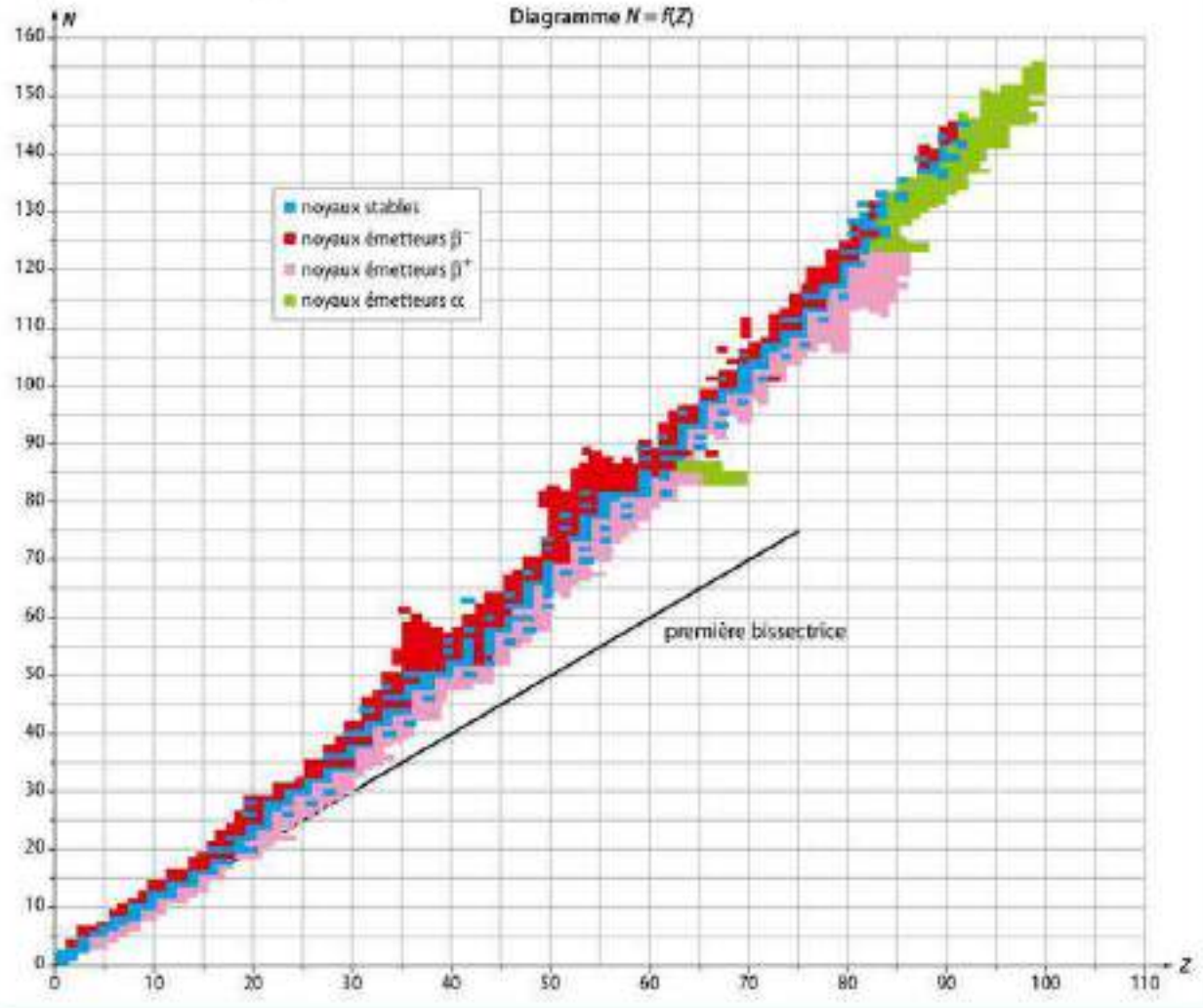
COMPÉTENCES :
APP Rechercher et organiser l'information
COM Utiliser un vocabulaire adapté

Diagramme de stabilité des noyaux

Comment interpréter ce diagramme qui permet de distinguer les noyaux stables de ceux qui ne le sont pas ?

DOC 1 Diagramme (*N*, *Z*)

Ce diagramme porte en abscisse le nombre de protons *Z* d'un noyau et en ordonnée son nombre de neutrons *N*. On y retrouve tous les noyaux connus.



EXPLOITATION ET ANALYSE

1 Comparer le nombre de protons et le nombre de neutrons des noyaux stables :
a. jusqu'à $Z = 20$;
b. au-delà de $Z = 20$.

2 Que peut-on dire :
a. des noyaux qui donnent lieu à des désintégrations β^+ et β^- ?
b. du quotient $\frac{N}{Z}$ pour chacun de ces types de désintégration ?

3 Caractériser les noyaux pour lesquels on peut observer des émissions α.

SYNTHÈSE

4 Repérer, sur le diagramme (*N*, *Z*), une zone dite la « vallée de la stabilité » et une autre dite la « mer d'instabilité ».

Je réussis si...

- **Je sais distinguer dans un noyau les nombres de protons *Z*, de neutrons *N* et de nucléons *A*.**
- **Je sais déterminer les isotopes radioactifs à partir du diagramme (*N*, *Z*).**

COMPÉTENCES :
APP Rechercher et organiser l'information
COM Choisir un mode de représentation approprié

Différents types de radioactivité

Comment modéliser la transformation spontanée de noyaux instables lors des désintégrations radioactives ?

DOC 1 Équation d'une transformation nucléaire

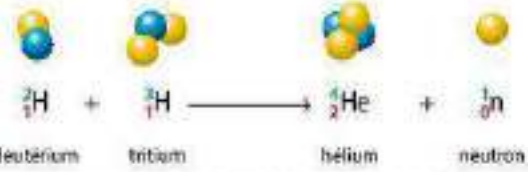
Dans une transformation nucléaire, les noyaux des atomes sont modifiés.

On modélise la transformation par une équation de réaction nucléaire qui obéit à des **lois de conservation** :

– conservation de la charge électrique ;

– conservation du nombre de nucléons.

Par exemple, lors d'une réaction de fusion dans les étoiles, l'équation s'écrit :



Il y a conservation de la charge électrique car $1 + 1 = 2 + 0$.

Il y a conservation du nombre de nucléons car $2 + 3 = 4 + 1$.

DOC 2 Différents types de radioactivité

Les noyaux pères instables peuvent se transformer spontanément en noyaux fils, cette transformation s'accompagne d'une émission de particules chargées.

- Lors de la radioactivité α, il y a émission d'un noyau d'hélium $^{4}_{2}He$ (ou particule α), tandis que lors d'une désintégration β, le noyau père libère un électron $^{0}_{-1}e$ (radioactivité β^-) ou un **positon** $^{0}_{1}e$ (radioactivité β^+).
- La plupart du temps, les noyaux issus d'une désintégration β sont dans un **état excité**, possédant trop d'énergie. C'est plus rare lors des désintégrations α.

On distingue le noyau fils excité à l'aide d'un astérisque ajouté à côté de son symbole : $^{A}_{Z}X^{*}$

Les noyaux fils obtenus se désexcitent en émettant un **photon**, noté γ, c'est-à-dire une onde électromagnétique de très courte longueur d'onde.

DOC 3 Applications de la radioactivité

Environ 90 % des noyaux connus sont instables.

En France, Henri Becquerel découvre en 1896 la radioactivité par l'intermédiaire d'un minerai contenant de l'uranium 238, radioactif α, qui se transforme en thorium Th.

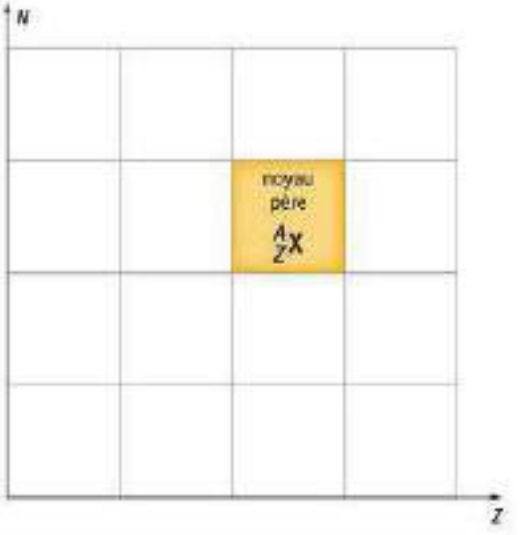
De nombreuses applications dans les domaines de la santé, la datation, l'industrie... font intervenir des noyaux radioactifs.

Exemples :

- Le fluor 18 est utilisé en imagerie médicale comme traceur radioactif, il donne de l'oxygène O par désintégration β^+.
- Le carbone 14 est utilisé en archéologie pour des datations. Il est radioactif β^- et se transforme en azote N.

Données : ${}_{6}C$; ${}_{9}F$; ${}_{92}U$.

DOC 4 Schématisation dans le diagramme (*N*, *Z*)



EXPLOITATION ET ANALYSE

1 Écrire les équations des réactions de désintégration (doc. 3).

2 Dans le cas de la radioactivité β, donner l'équation de la désexcitation.

3 Que se passe-t-il au niveau des constituants du noyau pour chaque transformation de la question 1 ?

SYNTHÈSE

4 Reproduire le schéma (doc. 4) et le compléter avec les symboles des noyaux fils obtenus à partir du noyau père par désintégrations α, β^- ou β^+. Relier les noyaux père et fils à l'aide de flèches.

Je réussis si...

- **Je sais distinguer les différents types de radioactivité.**
- **Je connais les lois de conservation de la charge électrique et du nombre de nucléons.**
- **Je sais écrire l'équation d'une réaction nucléaire.**

COMPÉTENCES :
APP Rechercher et organiser l'information
APP Schématiser une situation

Datation au carbone 14

Cette méthode permet en général d'estimer l'âge d'un objet. Elle peut être aussi utilisée pour authentifier une œuvre d'art.

DOC 1 La datation au carbone 14

La datation au carbone 14, connue depuis 1950, permet d'estimer l'âge d'un matériau organique tel que le bois, l'os, le cheveu, du tissu, c'est-à-dire de la matière autrefois vivante.



A *Ici, ce tronc du Kauri, un des conifères les plus anciens au monde et situé dans l'île Nord de la Nouvelle-Zélande, a été daté par la méthode du carbone 14 : de 7 000 à 50 000 ans.*





B *Momie d'un homme avec un manteau rouge, Musée des Beaux-arts, Lille.*

Principe de la méthode :

La proportion carbone 14 / carbone 12 est quasi constante dans les plantes, les animaux ou le corps humain, en contact avec l'atmosphère. À leur mort, le carbone n'est plus renouvelé et le carbone 14 radioactif qu'ils contiennent se désintègre. Il suffit de mesurer sa proportion dans un échantillon prélevé sur leur cadavre, leur squelette, ce qui en reste, pour connaître la date approximative de leur mort (végétal coupé, animal abattu...).

DOC 2 Datation d'un matériau inorganique

Des datations au carbone 14 de peinture au blanc de plomb, un matériau *a priori* minéral, ont été effectuées par les équipes du laboratoire de Paris-Saclay. Le blanc de plomb est un pigment utilisé en peinture et dans les cosmétiques depuis l'antiquité. Lors de la fabrication de ce pigment, le plomb au contact d'acide acétique (vinaigre) produit un dégagement de CO_2. Le pigment se forme donc en piégeant du CO_2. Le carbone d'origine organique est ainsi transféré dans un matériau inorganique.

DOC 3 Le prélèvement : étape nécessaire

Le prélèvement d'un échantillon de peinture sur un tableau est une pratique invasive.

Auparavant un milligramme de carbone était nécessaire pour la datation, mais cette quantité a été fortement réduite et les scientifiques pensent la diminuer encore. Un fragment d'environ 1 cm^2 au minimum est nécessaire, ce qui est énorme pour une petite toile de maître ! Aussi, les conservateurs d'œuvres d'art rechignent à recourir à la méthode au carbone 14 pour authentifier les œuvres de petit format.



Échantillon de peinture, prélevé sur le portail de la cathédrale de Reims, vu au microscope optique numérique.

EXPLOITATION ET ANALYSE

1 a. Quelle est la nature des objets pouvant être datés au carbone 14 ?

b. Pourquoi le blanc de plomb est-il éligible à cette méthode ?

2 a. Pour authentifier un tableau, on peut dater le cadre en bois ou la toile. Pourquoi cette méthode n'est-elle pas fiable ?

b. Quel problème l'analyse directe du pigment de peinture présente-t-elle ?

c. Comment les scientifiques espèrent-ils régler ce problème ?

SYNTHÈSE

3 Proposer un schéma synthétique du principe de la datation au carbone 14.

Je réussis si...

- **Je connais une application de la radioactivité à la datation.**
- **Je peux expliquer le principe de datation à l'aide de noyaux radioactifs.**

4. ACTIVITÉ DOCUMENTAIRE

CLASSE INVERSÉE

COMPÉTENCES :
APP Rechercher et organiser l'information
VAL Faire preuve d'esprit critique

Applications en médecine

Comment les éléments radioactifs sont-ils utilisés pour aider les médecins praticiens à établir un diagnostic ?

DOC 1 Techniques d'imagerie en médecine nucléaire

Le principe des techniques d'imagerie est d'administrer par voie intraveineuse un traceur radioactif au patient, puis de détecter le rayonnement émis.

L'élément radioactif utilisé dépend de l'organe à explorer. Il peut être employé soit seul, soit fixé sur une molécule (souvent du glucose). Sa localisation dans l'organisme se fait à l'aide d'un détecteur appelé *gamma caméra*.

Couplée à un système d'acquisition et d'analyse informatique, la gamma caméra donne des images numériques en 3D qui renseignent sur le fonctionnement des organes visés.

Le **temps de demi-vie** du radioélément doit être suffisamment long pour permettre le suivi du processus biologique étudié lors de l'examen, mais assez court pour éviter une irradiation inutile. En effet, ces rayonnements radioactifs sont ionisants, donc potentiellement dangereux.

DOC 2 Les éléments radioactifs de la scintigraphie

Lors d'une scintigraphie, différents éléments radioactifs sont utilisés, par exemple le technétium 99 pour la scintigraphie osseuse, le thallium 201 pour la scintigraphie du myocarde, ou l'iode 123 pour la scintigraphie de la thyroïde.

Flash PAGE vidéo

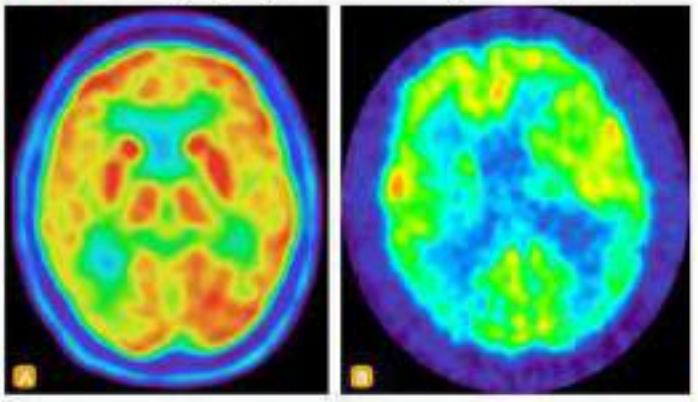
VIDÉO
La scintigraphie



VOCABULAIRE

- **Temps de demi-vie :** durée au bout de laquelle la moitié des noyaux d'une source radioactive s'est désintégrée.

DOC 3 La tomographie par émission de positons (TEP)



Le fluor 18 est actuellement l'émetteur de positons (particules β^+) le plus utilisé. Lorsque les positons entrent en collision avec des électrons, ils donnent naissance à des photons gamma.

Afin d'améliorer la détection d'anomalies, la gamma caméra peut être couplée à un scanner, on obtient alors un « TEP-Scan ». Cette technique permet la localisation de tumeurs à un stade très précoce, inaccessible aux autres techniques d'imagerie.

TEP-Scan de cerveau humain :

A *sujet sain ;*

B *sujet atteint de la maladie d'Alzheimer.*

EXPLOITATION ET ANALYSE

1 a. Qu'est-ce qui distingue une imagerie fonctionnelle d'une imagerie anatomique ?

b. Citer des exemples de ces deux types d'imagerie.

2 Quelle différence les techniques des documents 2 et 3 présentent-elles au niveau des émetteurs radioactifs ?

3 a. Quelles précautions le personnel soignant doit-il prendre en pratiquant ces examens ?

b. Y a-t-il des risques pour les patients ?

SYNTHÈSE

4 Quels sont les avantages de la scintigraphie et de la tomographie TEP par rapport aux autres techniques d'imagerie médicale ?

Je réussis si...

- **Je comprends le principe de la technique d'imagerie en médecine nucléaire.**
- **Je connais des applications de la radioactivité dans le domaine médical.**
- **Je peux citer une méthode de protection contre les rayonnements ionisants.**

1 Stabilité et instabilité des noyaux

Diagramme (N, Z)

■ Pour un élément chimique donné, il existe en général des noyaux isotopes **stables** et d'autres **instables**.

EXEMPLE

Le noyau de carbone 12 ($^{12}_{6}C$) est stable alors que le carbone 14 ($^{14}_{6}C$), qui contient 2 neutrons de plus, ne l'est pas.

Le **diagramme (N, Z)** permet de repérer les noyaux instables (FIG. 1), N étant le nombre de neutrons et Z le nombre de protons.
Cette instabilité résulte d'un excès de nucléons ou d'une proportion neutrons/protons déséquilibrée.

■ Les noyaux légers jusqu'à $Z \approx 20$ sont stables si $N = Z$.
Les noyaux plus lourds sont stables s'ils présentent un excès de neutrons par rapport aux protons.

Les noyaux instables, dits **radioactifs**, se transforment spontanément en d'autres noyaux plus stables lors de **désintégrations** en émettant des rayonnements sous forme de particules chargées.

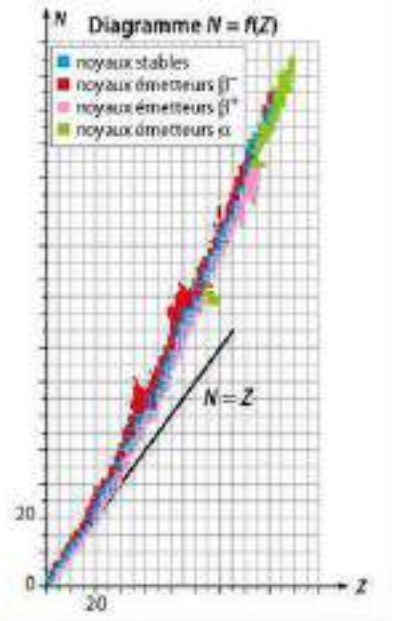


FIG. 1 Sur le diagramme (N, Z), on peut repérer les noyaux stables regroupés dans la **vallée de la stabilité**.

Équation de désintégration

L'équation de réaction nucléaire doit respecter les **lois de conservation** de la **charge électrique** et du **nombre de nucléons**.
Si l'équation est $^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A'}_{Z'}X' + {}^{A''}_{Z''}X''$ alors $Z = Z' + Z''$ et $A = A' + A''$.

EXEMPLE

Une réaction de fusion dans le Soleil entre deux isotopes de l'hydrogène s'écrit : $^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n$ et on a : $2 + 3 = 4 + 1$ et $1 + 1 = 2 + 0$.

Radioactivités α et β

Un noyau lourd contenant trop de nucléons (FIG. 1) peut subir une **désintégration α** en libérant un **noyau d'hélium** : $^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}X' + {}^{4}_{2}He$

Cette transformation permet d'éliminer 4 nucléons.

EXEMPLE

La désintégration α du radon s'écrit : $^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He$

Un noyau qui possède un excès de neutrons par rapport aux protons (FIG. 1) peut subir une **désintégration β⁻** en libérant un **électron** :

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}X' + {}^{0}_{-1}e$$

Cette désintégration transforme un neutron en proton.

EXEMPLE

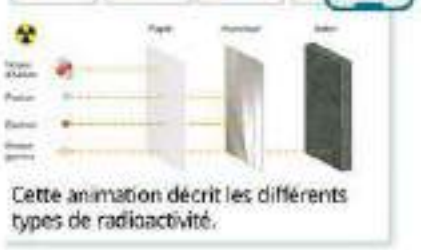
La désintégration β⁻ du carbone 14 s'écrit : $^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + {}^{0}_{-1}e$

Inversement, un noyau qui possède un excès de protons par rapport aux neutrons (FIG. 1) peut subir une **désintégration β⁺** en libérant un **positon** :

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}X' + {}^{0}_{+1}e$$

Cette désintégration transforme un proton en neutron.

BONUS
Types de radioactivité



Cette animation décrit les différents types de radioactivité.

VOCABULAIRE

Positon : particule chargée qui possède la même masse que l'électron mais une charge opposée positive, on parle d'antiélectron.

EXEMPLE

La désintégration β^+ du sodium 22 s'écrit : ${}^{22}_{11}\text{Na} \rightarrow {}^{22}_{10}\text{Ne} + {}^{0}_{+1}\text{e}$

Radioactivité γ

■ La plupart du temps, les noyaux issus d'une désintégration β sont dans un **état excité**, possédant trop d'énergie, phénomène rare lors des désintégrations α. Ces noyaux sont repérés avec un astérisque accolé à leur symbole **X***. Le retour à l'état fondamental s'effectue avec émission d'un ou de plusieurs photons gamma (FIG. 1).

Les noyaux fils obtenus par désintégration se désexcitent en émettant une **onde électromagnétique** de très courte longueur d'onde : c'est la **radioactivité gamma**, notée γ.

EXEMPLE

Le noyau de nickel formé par radioactivité β^- selon : ${}^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow {}^{60}_{28}\text{Ni}^* + {}^{0}_{-1}\text{e}$ est instable, on le note avec un astérisque. Il se stabilise en émettant 2 photons γ selon : ${}^{60}_{28}\text{Ni}^* \rightarrow {}^{60}_{28}\text{Ni} + 2\,\gamma$

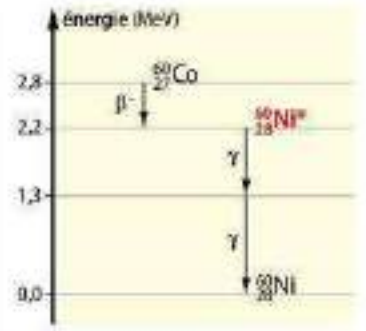


FIG. 2 Le noyau de nickel 60 se stabilise en émettant 2 photons γ.

Radioactivité naturelle

L'être humain est soumis à une **radioactivité naturelle** provenant à la fois de la Terre et de l'espace (FIG. 3).

■ L'écorce terrestre contient des noyaux radioactifs depuis sa formation. Les aliments, l'eau et l'air que nous ingérons contiennent des éléments radioactifs sans danger notable.

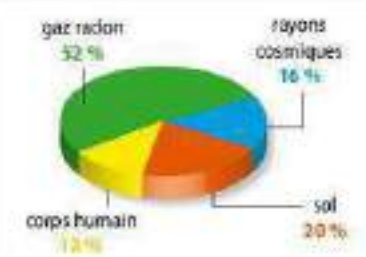


FIG. 3 Sources de radioactivité naturelle sur Terre.

2 Décroissance radioactive

Loi de décroissance radioactive

■ Un noyau radioactif se transforme pour être plus stable, il s'agit d'un **phénomène aléatoire**.

On note N_0 le nombre initial de noyaux radioactifs, tous identiques, présents dans un échantillon et $N(t)$ le nombre de noyaux radioactifs restants à la date t avec $N(t) < N_0$.

La variation du nombre de noyaux $\Delta N = N(t) - N_0$, c'est-à-dire le nombre moyen de désintégrations, est proportionnelle au nombre de noyaux $N(t)$ et à la durée de mesure Δt :

$$\Delta N = -\lambda \cdot N(t) \cdot \Delta t$$

Le coefficient de proportionnalité λ est appelé **constante radioactive**, il est caractéristique d'un noyau et s'exprime en s^{-1}.

$\Delta N = -\lambda \cdot N(t) \cdot \Delta t$ donc $\dfrac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda \cdot N(t)$. En faisant tendre Δt vers 0, on obtient $\dfrac{dN(t)}{dt} = -\lambda \cdot N(t)$: c'est une **équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants** de type $y' = a \cdot y$.

Sa résolution donne $y(x) = K \cdot e^{a \cdot x}$, on en déduit que $N(t) = K \cdot e^{-\lambda \cdot t}$.

À $t = 0$ s, on a : $N(0) = N_0$, alors $K = N_0$ et $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$.

La solution de l'équation différentielle $\dfrac{dN(t)}{dt} = -\lambda \cdot N(t)$ est :

$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$ avec λ exprimé en s^{-1} et t en s (FIG. 4).

BONUS

Décroissance radioactive



Une animation pour comprendre la courbe de décroissance radioactive de noyaux différents.

UN PONT VERS LES MATHS

Équation différentielle linéaire

Une équation différentielle de la forme

$$u' + ku = 0$$

$$\left(\text{ou } \frac{du}{dt} + ku = 0\right)$$

admet pour solution la fonction :

$$u(t) = u_0\, e^{-kt}$$

La constante u_0 est déterminée grâce à la condition initiale : $u(0) = u_0$.

→ Fiche MATHS p. 533

Temps de demi-vie

Le **temps de demi-vie**, noté $t_{1/2}$, est la durée nécessaire à la désintégration de la moitié des noyaux d'un échantillon radioactif (FIG. 4).
Caractéristique du noyau radioactif, il est exprimé en seconde, année...

Au bout de la durée $t_{1/2}$, il reste $\frac{N_0}{2}$ noyaux radioactifs, donc :
$N(t_{1/2}) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t_{1/2}} = \frac{N_0}{2}$ soit $-\lambda \cdot t_{1/2} = -\ln 2$, d'où $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$.

Le temps de demi-vie est $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$ avec $t_{1/2}$ exprimé en s et λ en s^{-1}.

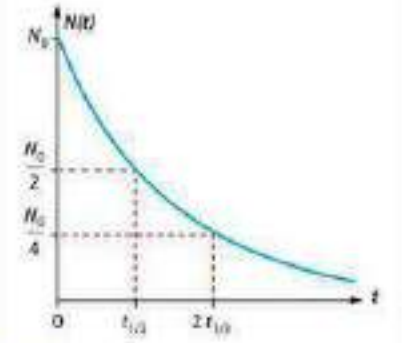


FIG. 4 La loi d'évolution temporelle d'une population de noyaux radioactifs est une courbe décroissante. Elle permet de déterminer graphiquement le temps de demi-vie $t_{1/2}$.

Activité

L'**activité** A d'un échantillon radioactif est le nombre moyen de désintégrations s'y produisant par seconde. Elle s'exprime en **becquerel**, noté Bq. 1 Bq correspond à 1 désintégration par seconde.

$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt}$ et $\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda \cdot N(t)$, donc $A(t) = \lambda \cdot N(t)$.
Comme $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$ alors $A(t) = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$.
En posant $A_0 = \lambda \cdot N_0$, on peut écrire : $A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$.

L'activité suit la même loi de décroissance que la population de noyaux radioactifs : $A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$ avec λ exprimé en s^{-1} et t en s.

■ L'activité est mesurée à l'aide d'un compteur de radioactivité ou compteur Geiger-Müller (FIG. 5).



FIG. 5 Un compteur Geiger-Müller.

3 Applications de la radioactivité

Datation isotopique

La loi de décroissance radioactive permet de **dater** un échantillon si on connaît le nombre initial N_0 de noyaux radioactifs en mesurant l'activité $A(t)$ de l'échantillon ou le nombre $N(t)$ de noyaux restants à la date t.

Le plus connu des isotopes radioactifs utilisés est le carbone 14.

Domaine médical

La radioactivité est un phénomène naturel, mais on crée des éléments **radioactifs artificiels** utilisés en **radiothérapie** et en **imagerie médicale**.

Protection contre les rayonnements

■ Les rayonnements issus de la radioactivité sont **ionisants**. Selon leur énergie et leur nature, ils peuvent avoir des effets néfastes sur les molécules du vivant.

■ Les rayonnements α ou β sont complètement absorbés par la matière, ce n'est pas le cas des rayons γ.
Pour se protéger des rayonnements ionisants, il faut **blinder** la source, s'en éloigner ou mettre en place des **écrans** dont l'efficacité dépend de la nature et de l'épaisseur du matériau absorbant (FIG. 6).

Source radioactive	Pénétration des tissus	Effet sur l'organisme
particules α	arrêtées par la peau	aucun
particules β	traversent l'épiderme	lésions cutanées
rayons γ	très pénétrants	tissus ou organes atteints

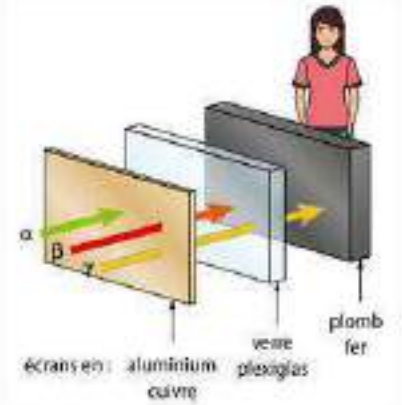


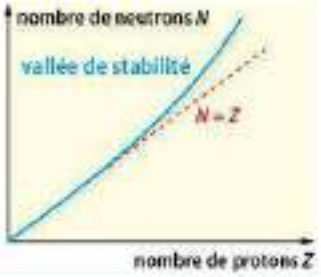
FIG. 6 Protection contre les rayonnements.

FICHE MÉMO PRÉPA BAC

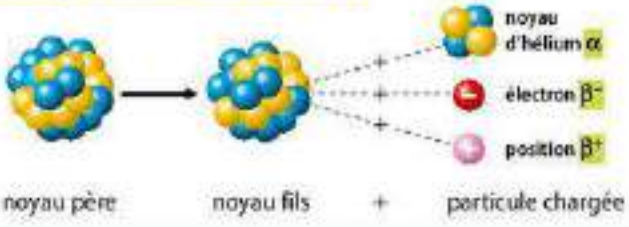
Le vocabulaire à retenir
Les relations à connaître

1 Stabilité et instabilité des noyaux

Diagramme (N, Z)



Désintégrations radioactives α et β



Lois de conservation pour l'équation d'une réaction nucléaire

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A'}_{Z'}X + {}^{A''}_{Z''}X $$

- conservation de la **charge électrique** : $Z = Z' + Z''$
- conservation du **nombre de nucléons** : $A = A' + A''$

Radioactivité gamma

$$ {}^{A}_{Z}X^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z}X + \gamma $$

noyau fils excité — noyau fils à l'état fondamental — onde électromagnétique

2 Décroissance radioactive

Évolution temporelle d'une population de noyaux radioactifs

$$ \Delta N = -\lambda \cdot N(t) \cdot \Delta t $$

ΔN : nombre moyen de désintégrations ; $N(t)$: nombre de noyaux radioactifs ; Δt : durée (en s) de mesure ; λ : constante radioactive (en s^{-1})

Temps de demi-vie $t_{1/2}$

$$ t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} $$

$t_{1/2}$ (en s) ; λ : constante radioactive (en s^{-1})

Activité A

$$ A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} $$

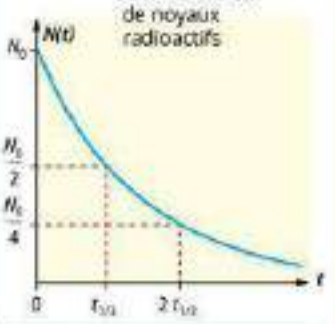
$A(t)$ (en Bq) ; t : temps (en s) ; A_0 : activité initiale (en Bq) ; λ : constante radioactive (en s^{-1})

(Bq : becquerel)

Loi et courbe de décroissance radioactive

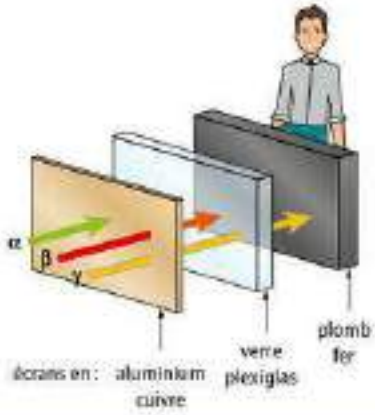
$$ N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} $$

$N(t)$: nombre de noyaux radioactifs ; λ : constante radioactive (en s^{-1}) ; t : temps (en s) ; N_0 : nombre initial de noyaux radioactifs



3 Applications de la radioactivité

- **datation**
- **domaine médical**
  - imagerie
  - radiothérapie
- **protection contre les rayonnements**



Vérifier l'essentiel

EN AUTONOMIE

Pour chaque question, choisir la ou les bonnes réponses. ➡ SOLUTIONS EN PAGE 593

Flash PAGE corrigés détaillés

Flash PAGE QCM interactifs

1 Stabilité et instabilité des noyaux

	A	B	C
1 **Le diagramme (*N*, *Z*) :**	permet de connaître les isotopes radioactifs.	porte en ordonnée le nombre de nucléons.	porte en ordonnée le nombre de neutrons.
2 **Les noyaux radioactifs :**	sont instables.	peuvent se désintégrer.	sont des noyaux lourds.
3 **La radioactivité :**	est toujours naturelle.	permet de transformer un élément en un autre.	nécessite un apport d'énergie.
4 $^{30}_{15}P \rightarrow {}^{30}_{14}Si + {}^{0}_{1}e$ **est l'équation d'une :**	désintégration α.	désintégration β^+.	désintégration β^-.
5 **Une désintégration α permet d'éliminer :**	4 nucléons.	4 protons.	4 neutrons.

2 Décroissance radioactive

	A	B	C
6 **Le nombre moyen de désintégrations est proportionnel :**	au nombre de noyaux radioactifs.	à la température de l'échantillon.	à la durée de mesure.
7 **La loi d'évolution temporelle d'une population de noyaux radioactifs est :**	une courbe croissante.	une courbe décroissante.	une courbe exponentielle.
8 **La constante radioactive λ et le temps de demi-vie $t_{1/2}$ sont liées par :**	$t_{1/2} = \frac{\log 2}{\lambda}$	$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$	$t_{1/2} = \frac{\lambda}{\ln 2}$
9 **L'activité d'une source radioactive est :**	proportionnelle à la masse de la source.	le nombre de désintégrations par seconde.	mesurée à l'aide d'un becquerelmètre.

3 Applications de la radioactivité

	A	B	C
10 **Pour réaliser une datation, on peut :**	mesurer l'activité d'un échantillon.	mesurer le nombre de noyaux radioactifs restants dans un échantillon.	utiliser du carbone 12.
11 **Dans le domaine médical, une application de la radioactivité peut être :**	la radiothérapie.	la chimiothérapie.	la curiethérapie.
12 **Les rayonnements ionisants absorbés complètement par la matière sont :**	α	β	γ
13 **On se protège mieux des rayons γ avec un écran :**	épais.	fin.	composé d'un élément lourd.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Acquérir les bases

1 Stabilité et instabilité des noyaux

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Déterminer, à partir d'un diagramme (*N*, *Z*), les isotopes radioactifs d'un élément.
- Écrire l'équation d'une réaction nucléaire.
- Identifier les différents types de radioactivité.

Acquérir les bases : 15 17 S'entraîner : 25 30

DONNÉES

X	Ar	Ca	Rh	Pd	Ag	Cd	In
Z	18	20	45	46	47	48	49

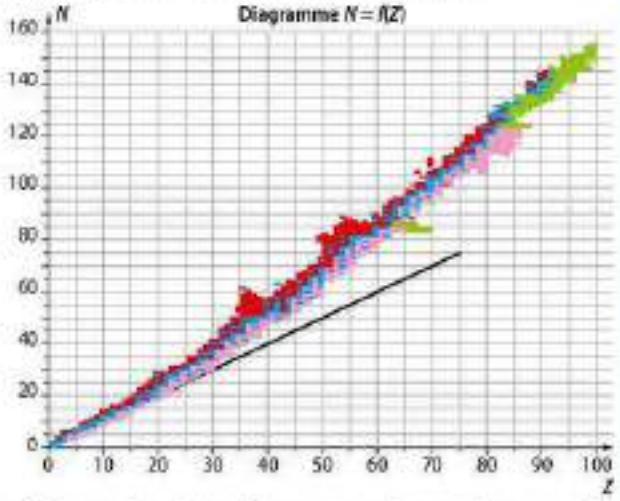
14 Problème de stabilité

Un noyau est instable s'il présente :
- soit un excès de protons par rapport aux neutrons ;
- soit un excès de neutrons par rapport aux protons ;
- soit un excès de protons et de neutrons.

1. Donner la définition de la radioactivité.

2. Sur le diagramme ci-dessous, on retrouve tous les noyaux connus à ce jour.

Les noyaux en bleu sont les noyaux stables, ils sont situés dans ce que l'on nomme la *vallée de la stabilité*.



a. Comment sont classés les noyaux dans ce diagramme ?
b. Attribuer aux zones rouges, rose et verte leur cause d'instabilité parmi celles citées dans l'énoncé.
c. Pourquoi parle-t-on de vallée de la stabilité ?

15 Équations

1. Citer les lois de conservation nécessaires à l'écriture d'une équation de réaction nucléaire.

2. Vérifier si ces lois sont respectées pour ces équations :

a. $^{210}_{84}Po \rightarrow {}^{206}_{82}Pb + {}^{4}_{2}He$ b. $^{7}_{4}Be + {}^{1}_{1}H \rightarrow 2\ {}^{4}_{2}He$

c. $^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{139}_{54}Xe + {}^{94}_{38}Sr + {}^{1}_{0}n$

d. $^{4}_{2}He + {}^{9}_{4}Be \rightarrow {}^{12}_{6}C$

16 Le potassium 40

Le potassium 40 ($^{40}_{19}K$) est partiellement responsable de la radioactivité du corps humain. C'est un noyau radioactif qui peut se transformer en calcium 40 (^{40}Ca) ou en argon 40 (^{40}Ar), en émettant une particule chargée.

1. Quel doit être nécessairement le nombre de nucléons de chaque particule émise ? Justifier la réponse.

2. Parmi les transformations, l'une émet un électron $^{0}_{-1}e$, l'autre un positon $^{0}_{1}e$.

Écrire les équations des deux réactions nucléaires citées.

17 Noyau d'argent

Le noyau d'argent 108 est radioactif. Il se désintègre suivant plusieurs processus dont les radioactivités β^- et β^+.

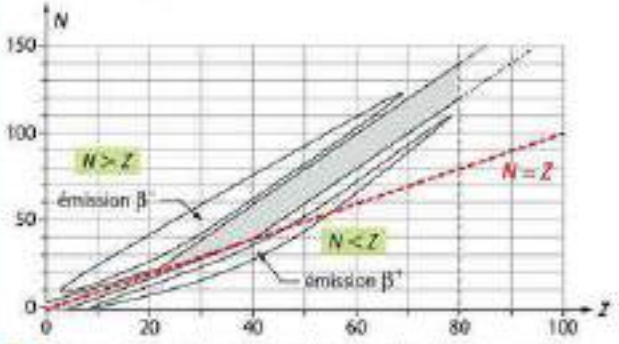
1. Rappeler les deux lois de conservation qui permettent d'écrire l'équation d'une réaction nucléaire.

2. a. Quelle est la nature des particules émises au cours de la radioactivité β^- ? la radioactivité β^+ ?
b. Écrire leur symbole.

3. Écrire les équations correspondant à chacune des transformations radioactives pour le noyau d'argent 108.

18 Transformation nucléaire

Le diagramme (*N*, *Z*) représenté ici est très simplifié, *Z* étant le nombre de protons et *N* le nombre de neutrons.



1. Que représente la zone grisée dans le diagramme ?

2. Soit la réaction nucléaire indiquée par la flèche ci-dessous entre un noyau père et son noyau fils.

$^{148}_{62}Sm$		$^{148}_{60}Nd$
$^{147}_{62}Sm$		
		$^{146}_{60}Nd$
	$^{145}_{61}Pm$	$^{145}_{60}Nd$
$^{144}_{62}Sm$		$^{144}_{60}Nd$
		$^{143}_{60}Nd$

a. Sachant qu'une seule particule est émise en plus du noyau fils, écrire la réaction de désintégration nucléaire du samarium Sm et indiquer les lois de conservation qui régissent toute réaction nucléaire.
b. De quel type de radioactivité s'agit-il ?
c. Où seront situés sur le diagramme (*N*, *Z*) les noyaux concernés par ce type de désintégration ?

3. Un isotope du noyau néodyme Nd peut-il subir *a priori* une désintégration β^- pour devenir du prométhium Pm ? Si oui, lequel ?

2 Décroissance radioactive

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Établir l'expression de l'évolution temporelle de la population de noyaux radioactifs.
- Exploiter la loi et une courbe de décroissance radioactive.
- Résoudre une équation différentielle.

➥ Acquérir les bases : 28 ➥ S'entraîner : 25 27

19 Carbone 14

L'activité d'un échantillon $A(t)$ est le nombre de désintégrations produites par unité de temps, soit :

$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt}$$

$A(t)$ est proportionnelle à $N(t)$ qui est le nombre de noyaux radioactifs présents, soit $A(t) = \lambda \cdot N(t)$.

On peut lire l'information suivante sur Internet au sujet du carbone 14 :

> Pour obtenir une quinzaine de désintégrations par minute avec un matériau récent, il faut 1 g de carbone, c'est-à-dire que l'on doit disposer de 10 g de bois, de tissu ou de cuir, 20 g de coquillage ou 200 g d'os.

Donnée : $\lambda = 3{,}93 \times 10^{-12}\ s^{-1}$ *pour* ^{14}C.

1. Quelle est, en becquerel, l'activité des 200 g d'os prélevés sur un individu mort récemment ?

2. a. Établir l'équation différentielle donnant le nombre de noyaux $N(t)$ en fonction du temps.
b. Vérifier que l'expression $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$ est solution de l'équation différentielle établie précédemment.

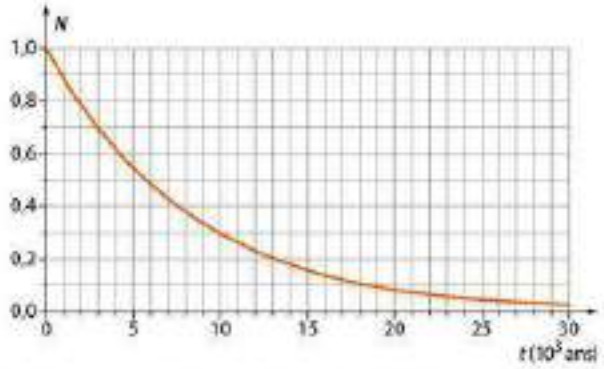
3. Calculer le nombre de noyaux radioactifs présents dans l'échantillon d'os.

20 Élément radioactif

On considère un échantillon de noyaux radioactifs.

Soit N_0 le nombre de noyaux à un instant pris comme origine des temps.

On a tracé la courbe traduisant l'évolution du nombre de noyaux radioactifs N en fonction du temps.



Données : *temps de demi-vie de quelques éléments.*

césium 137	cobalt 60	carbone 14	radium 226
30 ans	5,3 ans	$5{,}7 \times 10^3$ ans	$1{,}6 \times 10^3$ ans

1. Établir l'équation correspondant à la représentation graphique fournie.

2. a. Qu'appelle-t-on temps de demi-vie $t_{1/2}$?
b. En déduire sa valeur.
c. De quel élément radioactif s'agit-il ?

3. a. Établir la relation entre le temps de demi-vie $t_{1/2}$ et la constante radioactive λ de cet élément.
b. Calculer la valeur de cette constante radioactive.

21 Activité d'un échantillon

Soit un échantillon contenant N_0 noyaux d'argent 108 à l'instant $t = 0$ s.

$N(t)$ est le nombre de noyaux restant à l'instant t.

1. Établir l'expression de $N(t)$ en fonction de N_0, t et λ, la constante radioactive.

2. Quelle est la définition du temps de demi-vie $t_{1/2}$?

3. Établir la relation entre le temps de demi-vie et la constante radioactive. Quelle est l'unité de λ ?

4. a. Définir l'activité d'une source radioactive.
b. Quelle est son unité dans le Système international ? À quoi correspond-elle ?
c. Comment mesure-t-on cette grandeur ?

5. Montrer que l'activité peut s'écrire : $A(t) = \lambda \cdot N(t)$.

3 Applications de la radioactivité

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Applications de la radioactivité
- Expliquer le principe de la datation à l'aide de noyaux radioactifs et dater un événement.
- Citer quelques applications de la radioactivité dans le domaine médical.

➥ Acquérir les bases : 23 ➥ S'entraîner : 30

Protection contre les rayonnements
- Citer des méthodes de protection contre les rayonnements ionisants et des facteurs d'influence de ces protections.

➥ Acquérir les bases : 24 ➥ S'entraîner : 33

22 Médecine nucléaire

La scintigraphie consiste à introduire dans l'organisme des substances radioactives appelées traceurs.



Le rayonnement γ qu'ils émettent traverse les tissus vivants de l'organisme, il est détecté par une gamma caméra permettant d'obtenir des images utiles au diagnostic médical.

Les traceurs, comme le technétium 99 ou l'iode 131, sont choisis parce que leur activité décroît rapidement.

La radiothérapie est utilisée pour soigner des tumeurs.
Le principe consiste à bombarder la tumeur avec le rayonnement β^- émis par le cobalt 60.
Dans certains cas, il faut une source radioactive plus ionisante, on utilise alors un rayonnement de type α, plus massif que les autres.

1. Quelle propriété commune les traceurs radioactifs présentent-ils ?

2. Citer une particularité des radioéléments utilisables en scintigraphie.

3. Justifier la phrase « un rayonnement de type α, plus massif que les autres ».

4. À l'aide de ce tableau, justifier le choix de l'iode 131 en scintigraphie.

	Activité (en Bq)	
	au moment de l'injection	**400 jours après l'injection**
Iode 131 dont $t_{1/2}$ = 8 jours	2×10^5	6×10^{-3}
Un traceur dont $t_{1/2}$ = 80 jours	2×10^5	6 255

5. Quelles précautions le personnel hospitalier doit-il prendre lors d'un examen en scintigraphie ? Justifier la réponse.

23 Datation d'un drakkar

Le carbone 14 est continuellement produit dans la haute atmosphère, d'où le maintien d'une teneur constante dans l'atmosphère. Ce carbone 14 formé réagit rapidement avec le dioxygène de l'air en donnant du dioxyde de carbone CO_2.

Tous les organismes vivants échangent moyennant la respiration et l'alimentation du CO_2 avec l'atmosphère. Ils fixent dans leurs tissus jusqu'à leur mort le carbone 14 à une teneur égale à celle de l'atmosphère.
Après la mort, l'absorption et le rejet de dioxyde de carbone s'arrêtent.



En 1983, l'épave d'un drakkar a été découverte dans la vase du port de Roskilde, au Danemark.
Une datation au carbone 14 a été réalisée sur un échantillon de bois.

L'activité A mesurée était de 12,0 désintégrations par minute et par gramme de carbone. Or l'activité A_0 pour 1 gramme de carbone, participant au cycle du dioxyde de carbone de l'atmosphère, vaut 13,6 désintégrations par minute.

Donnée :
• *La constante radioactive du carbone 14 est* $\lambda = 3{,}87 \times 10^{-12}\ s^{-1}$.

1. Justifier la variation d'activité d'un échantillon de bois mort au cours du temps.

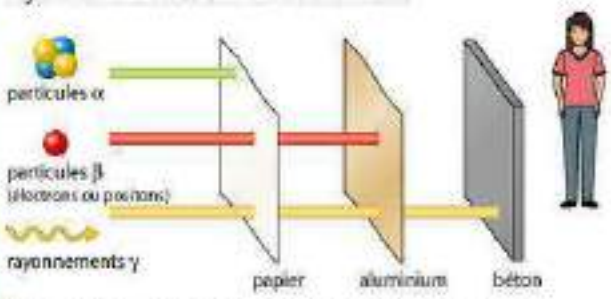
2. La loi de décroissance de l'activité A en fonction du temps t s'écrit : $A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$.

a. Exprimer t en fonction des grandeurs $A(t)$, A_0 et λ. Calculer sa valeur.

b. Déterminer approximativement l'année de construction du bateau.

24 Dangerosité des sources radioactives

Le document ci-dessous récapitule les différents types de rayonnements issus de la radioactivité.



1. Quels sont les rayonnements les plus pénétrants ?

2. Pourquoi les rayonnements α sont-ils facilement absorbés par les matériaux et les tissus humains ?

Faire le point avant d'aller plus loin

PRÉPA BAC

Pour vérifier ses connaissances, répondre aux questions suivantes (sans regarder le cours !)

- Citer les lois de conservation vérifiées dans l'équation d'une réaction nucléaire.
- Expliciter les différents types de radioactivité en précisant les particules ou les rayonnements mis en jeu.
- Préciser dans quel cas intervient la radioactivité γ.
- Résoudre l'équation différentielle : $\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda \cdot N(t)$
- Décrire comment obtenir graphiquement le temps de demi-vie à partir de la courbe de décroissance radioactive.
- Expliquer le principe de datation à l'aide de noyaux radioactifs.
- Citer un moyen de protection contre les rayonnements ionisants.
- Citer des applications de la radioactivité dans le domaine médical.

Retrouver ces questions en version numérique Flash PAGE cartes mémos

Exercice résolu — EN AUTONOMIE



25 Du lait radioactif !

Le lait de vache contient du césium 137, un élément radioactif β^- dont l'activité est de l'ordre de 0,22 Bq pour un litre de lait.

La constante radioactive du césium 137 est $\lambda = 2{,}3 \times 10^{-2}$ an^{-1}.

On considère que la radioactivité du lait de vache est due uniquement à la présence de césium 137.

Données :

Élément X	iode I	xénon Xe	césium Cs	baryum Ba
Z	53	54	55	56

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- **L'activité** est proportionnelle au nombre moyen de noyaux radioactifs présents dans un échantillon.
- Les **données** permettent d'écrire l'équation d'une réaction de désintégration.

1. **Préciser** ce qu'est la radioactivité β^-.
2. Écrire l'équation de désintégration du césium 137. On admet que le noyau fils n'est pas obtenu dans un état excité.
3. Combien de désintégrations par seconde se produit-il dans un litre de lait ?
4. **Déterminer** le nombre de noyaux radioactifs de césium 137 présents dans un litre de lait.
5. On prend comme origine des temps l'instant où on mesure l'activité d'un litre de lait de vache. **En déduire** au bout de combien de temps il ne restera plus que 1 % de cette activité.

LES VERBES D'ACTION

- **Préciser** : apporter une information nouvelle.
- **Déterminer** : mettre en œuvre une stratégie pour trouver un résultat.
- **En déduire** : intégrer la donnée précédente pour répondre.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. La radioactivité β^- est la désintégration spontanée d'un noyau instable qui se transforme en un autre noyau en libérant un électron.

2. $^{137}_{55}\text{Cs} \rightarrow {}^{137}_{56}\text{Ba} + {}^{0}_{-1}\text{e}$

3. Pour un litre de lait, $A = 0{,}22$ Bq, donc il se produit **0,22 désintégration** par seconde.

4. L'activité A est proportionnelle au nombre de noyaux radioactifs $N(t)$:

$A(t) = \lambda \cdot N(t)$ donc $N(t) = \dfrac{A(t)}{\lambda}$ soit $N(t) = \dfrac{0{,}22}{7{,}3 \times 10^{-10}} = \mathbf{3{,}0 \times 10^{8}}$ **noyaux.**

5. $A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$ donc $\dfrac{A_0}{A(t)} = e^{\lambda \cdot t}$ et $\ln\left(\dfrac{A_0}{A(t)}\right) = \lambda \cdot t$ soit $t = \dfrac{\ln\left(\dfrac{A_0}{A(t)}\right)}{\lambda}$.

D'après l'énoncé, $\dfrac{A(t)}{A_0} = 1\,\%$ soit $\dfrac{A_0}{A(t)} = 100$, d'où $t = \dfrac{\ln(100)}{7{,}3 \times 10^{-10}}$ soit $t = \mathbf{6{,}3 \times 10^{9}}$ **s.**

QUELQUES CONSEILS

2. L'équation doit respecter les lois de conservation de la charge électrique et du nombre de nucléons.
3. Se rappeler la définition du becquerel.
4. Penser à convertir la constante radioactive dans l'unité du Système international.

EXERCICE SIMILAIRE

26 Séisme californien

Avant le séisme qui a touché San Francisco (photo) en 1989, on a prélevé à proximité de la faille de San Andreas en Californie un échantillon de végétal enseveli ; l'activité mesurée était alors $A = 0{,}223$ SI.

On admet que cette activité est due uniquement à la présence de ^{14}C.

Le carbone ^{14}C est un noyau radioactif émetteur β^-. Sa constante radioactive λ vaut $1{,}22 \times 10^{-4}$ an^{-1}.

Données :

- *Numéros atomiques :* $Z(\text{Be}) = 4$; $Z(\text{B}) = 5$; $Z(\text{C}) = 6$; $Z(\text{N}) = 7$; $Z(\text{O}) = 8$.



1. Écrire l'équation de la réaction nucléaire correspondant à la désintégration du carbone 14 en la justifiant. On admet que le noyau fils n'est pas obtenu dans un état excité.
2. Définir l'activité d'un échantillon radioactif et donner son unité dans le Système international.
3. L'activité A_0 d'un échantillon du même végétal vivant et de même masse est $A_0 = 0{,}255$ SI.
On note t la durée écoulée entre l'instant $t_0 = 0$ s du séisme et la mesure. Déterminer cette durée.
4. En déduire la date approximative à laquelle s'est produit le séisme.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Exercice résolu EN AUTONOMIE



27 Datation isotopique

Les éléments radioactifs sont utilisés pour évaluer le temps. Selon la nature et la durée de vie de ces éléments, ils renseignent sur l'âge de l'Univers ou de la Terre, les processus géologiques et même l'histoire de l'humanité.
On donne l'équation différentielle : $\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda \cdot N(t)$ où $N(t)$ est le nombre de noyaux radioactifs d'un échantillon à un instant de date t et N_0 le nombre de noyaux radioactifs à un instant pris comme origine des dates ($t_0 = 0$ s) pour ce même échantillon. λ est la constante radioactive.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- **L'équation différentielle** est linéaire du premier ordre, à coefficients constants.
- N_0 est la **condition initiale** sur le nombre de noyaux.

LES VERBES D'ACTION

- **Établir** : donner l'expression en la justifiant.
- **Préciser** : apporter une information nouvelle.
- **Déterminer** : mettre en œuvre une stratégie pour trouver un résultat.
- **En déduire** : intégrer la donnée précédente pour répondre.

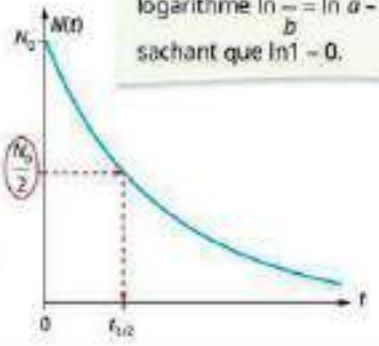
1. **Établir** la loi de décroissance radioactive.
2. Donner la définition du temps de demi-vie d'un échantillon radioactif que l'on notera $t_{1/2}$.
3. **Préciser** l'allure de la courbe $N = f(t)$ et expliquer comment obtenir graphiquement la valeur de $t_{1/2}$.
4. **Déterminer** l'expression littérale du temps de demi-vie $t_{1/2}$ en fonction de la constante radioactive λ.
5. Le temps de demi-vie de l'isotope du carbone ^{14}C est $5{,}70 \times 10^3$ ans.
En déduire la valeur de sa constante radioactive λ en an^{-1}.

QUELQUES CONSEILS

3. Exploiter la définition donnée à la question précédente.
4. Utiliser la propriété du logarithme $\ln\frac{a}{b} = \ln a - \ln b$ sachant que $\ln 1 = 0$.

EXEMPLE DE RÉDACTION

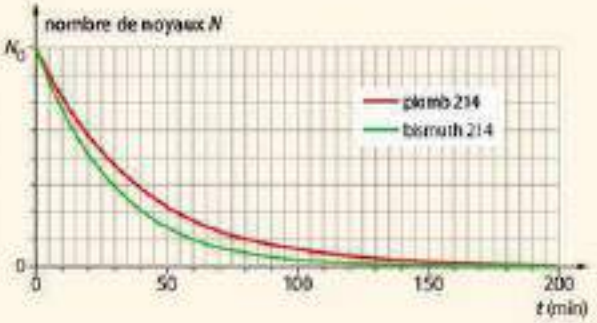
1. La résolution de l'équation différentielle donne $N(t) = K \cdot e^{-\lambda \cdot t}$.
Comme à $t = 0$ s, on a $N(0) = N_0$, alors $K = N_0$ soit $\boldsymbol{N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}}$.
2. Le temps de demi-vie d'un échantillon radioactif est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux initialement présents se sont désintégrés.
3. $N = f(t)$ a une allure de courbe décroissante. On détermine graphiquement $t_{1/2}$ à partir de la valeur $\frac{N_0}{2}$.
4. Par définition, à $t = t_{1/2}$, on a $N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2}$.
En utilisant la loi de décroissance radioactive, on écrit : $N(t_{1/2}) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t_{1/2}}$,
donc $N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t_{1/2}} = \frac{N_0}{2}$, d'où $-\lambda \cdot t_{1/2} = \ln\frac{1}{2}$ soit $-\lambda \cdot t_{1/2} = -\ln 2$ et $\boldsymbol{t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}}$.
5. $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$ donc $\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{\ln 2}{5{,}70 \times 10^3}$ soit $\boldsymbol{\lambda = 1{,}22 \times 10^{-4}\ an^{-1}}$.



EXERCICE SIMILAIRE

28 Détection par un compteur de radioactivité

On dispose d'un aspirateur muni d'un filtre pour récupérer des poussières de l'air ambiant.
À l'aide d'un compteur Geiger-Müller, on mesure le niveau de radioactivité de ces poussières qui contiennent entre autres des noyaux radioactifs de plomb 214 et de bismuth 214.



1. À partir de l'équation différentielle $\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda \cdot N(t)$, établir l'expression de l'évolution temporelle du nombre N de noyaux d'un échantillon radioactif.
2. Donner la définition de son temps de demi-vie $t_{1/2}$.
3. Comparer graphiquement les temps de demi-vie du plomb 214 et du bismuth 214.
4. Déterminer lequel des deux radioéléments possède la constante radioactive la plus grande.

S'entraîner pour maîtriser

SAVOIR RÉDIGER

29 Proposer une correction de la solution donnée par un élève à l'énoncé.

Énoncé

Le texte ci-dessous est un extrait de la Conférence Nobel de 1935, qui s'est tenue à l'occasion de la remise du prix Nobel de Chimie à Irène Curie et Frédéric Joliot pour l'expérience et l'interprétation du bombardement d'une feuille d'aluminium par des particules alpha (noyaux d'hélium).

« Le phénomène se produit en deux temps : il y a d'abord capture de la particule alpha et expulsion instantanée du neutron, avec formation d'un atome radioactif qui est un isotope du phosphore de masse 30, alors que l'atome stable de phosphore a une masse égale à 31. Ensuite, cet atome instable, ce radioélément nouveau, que nous avons appelé radiophosphore, se désintègre. »

Données :

• Numéros atomiques pour le phosphore et l'aluminium :
Z(P) = 15 ; Z(Al) = 13.

1. Expliquer la formation du phosphore 30 à partir de l'aluminium 27.
2. Cette transformation est-elle une désintégration radioactive ? Justifier la réponse.
3. Expliquer pourquoi cette expérience constitue la découverte de la radioactivité artificielle.

Solution proposée par un élève

1. L'aluminium a capté les deux protons de l'hélium et a expulsé un neutron selon l'équation : $^{27}_{13}Al + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{30}_{15}P + {}^{0}_{1}n$ — Respecter les 2 lois de conservation
2. Oui car cette transformation est spontanée — Distinguer spontanée et provoquée
3. Le phosphore 30 produit est radioactif et comme il n'existe pas dans la nature, on a donc produit un élément radioactif artificiel.

30 Le technétium HISTOIRE DES SCIENCES

Le technétium est un élément chimique de numéro atomique 43. Ce nom d'origine grecque « technetos » signifie « artificiel ». Il est le premier élément chimique produit sans être découvert dans la nature. Tous les isotopes connus du technétium sont radioactifs. En 1937, Carlo Perrier et Emilio Segrè ont synthétisé l'isotope 97 du technétium en bombardant du molybdène 96 avec du deutérium.



Actuellement, le technétium 99 est très utilisé en médecine nucléaire car son temps de demi-vie est court et réduit l'irradiation du patient tout en étant compatible avec la durée de l'examen.

Pour le fabriquer, il existe des générateurs à molybdène / technétium où le molybdène 99 se désintègre en technétium 99.

Données :

• Technétium 97 $^{97}_{43}Tc$; technétium 99 $^{99}_{43}Tc$; molybdène 96 $^{96}_{42}Mo$; molybdène 99 $^{99}_{42}Mo$; deutérium $^{2}_{1}H$.

• Temps de demi-vie du technétium 99 : $t_{1/2} = 6,0$ heures.

1. Énoncer les lois de conservation qui régissent les réactions nucléaires.
2. Écrire l'équation de la réaction nucléaire de synthèse du technétium 97 sachant qu'une particule est émise. Nommer cette particule.
3. Écrire l'équation de la désintégration du molybdène 99. De quel type de radioactivité s'agit-il ?
4. Définir le terme « temps de demi-vie ».
5. a. Citer deux applications de la radioactivité en médecine nucléaire.

Coup de pouce

▶ Les éléments radioactifs sont utilisés en médecine nucléaire.

b. Quel avantage l'utilisation du technétium présente-t-il ?

31 The Litvinenko case

In 2006, a former Russian spy, Alexander Litvinenko, was poisoned in London by means of 10 µg of polonium 210, which probably come from radioactive waste.

This element, discovered by Marie Curie in an ore, pitchblende, has an activity of 1.66×10^{14} Bq per gram. Its decay constant is $\lambda = 5.8 \times 10^{-8}\ s^{-1}$.

It emits helium nuclei, which are very harmful since they can be absorbed by human tissues.

1. Was the polonium-210 which poisoned Litvinenko of natural or artificial origin? What about the polonium-210 discovered by Marie Curie?
2. Determine the activity of 10 µg of polonium.
3. In days, what is the half-life of this radioisotope?

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

32 Un gaz méconnu

Le radon 222 est un gaz sans odeur ni couleur, présent à l'état naturel. On peut le trouver partout à la surface de la Terre, principalement dans les régions granitiques.
Radioactif, le radon laisse des traces parfois indélébiles dans l'organisme. Son inhalation augmente le risque de contracter un cancer. La première parade contre le radon est une bonne ventilation.



L'Union européenne préconise la mise en place d'actions correctives lorsque l'activité volumique moyenne dépasse 400 becquerels par mètre cube.

Pour mesurer la concentration en radon dans une pièce, on prélève de l'air dans une fiole où préalablement on a réalisé un vide partiel. La fiole est ensuite placée dans un détecteur qui compte le nombre total n_d de désintégrations α attribuées au seul radon 222. Le temps de comptage est fixé à 50 secondes. L'opération est répétée et les résultats, ramenés à une seconde, sont regroupés dans ces tableaux :

Mesure	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n_d	5	8	9	1	12	8	14	9	12	4

Mesure	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
n_d	9	8	6	9	10	4	9	8	10	6

Données :

X	U	Pa	Th	Ac	Ra	Fr	Rn	At
Z	92	91	90	89	88	87	86	85

1. Montrer qu'une série de désintégrations α de l'uranium 234 conduit au radon 222.

2. Calculer la meilleure estimation de cette série de mesures et son incertitude-type.

JE VÉRIFIE QUE J'AI...
- appliqué correctement les lois de conservation de la charge électrique et du nombre de nucléons ;
- utilisé correctement les outils statistiques de la calculatrice ou du tableur.

3. L'activité moyenne $\bar{A}$ du radon 222, exprimée en $Bq \cdot m^{-3}$, est $\bar{A} = k \cdot \bar{n_d}$ avec $k = 80$. La valeur du coefficient k dépend de l'appareillage utilisé. Quelles conclusions en tirer sur la qualité de l'air dans la pièce ?

33 Protection contre les rayonnements

Pour se protéger du rayonnement γ produit par un traceur radioactif, l'infirmière a utilisé, lors de l'injection de la dose au patient, un protège-seringue d'une épaisseur de 5 mm de plomb. La couche de demi-atténuation d'un matériau est l'épaisseur de ce matériau capable d'arrêter 50 % du rayonnement ionisant.

Le graphique suivant représente le pourcentage de rayonnement γ (produit par le traceur) transmis à l'extérieur en fonction de l'épaisseur de plomb.



1. Déterminer la valeur de la couche de demi-atténuation du plomb dans la situation de l'énoncé.

2. Justifier le choix d'une épaisseur de 5 mm pour le protège-seringue utilisé lors de l'injection du traceur.

34 Durée d'une scintigraphie

DÉMARCHES DIFFÉRENCIÉES

À 14 h, un infirmier injecte à la patiente qui va subir une scintigraphie une dose de technétium 99 d'activité $A_0 = 555$ MBq. Le temps de demi-vie du technétium 99 est $t_{1/2} = 6,0$ heures.
À la fin de l'examen, l'activité de la patiente est égale à 63 % de sa valeur mesurée à 14 h, juste après l'injection.

DÉMARCHE EXPERTE

Déterminer l'heure à laquelle l'examen va se terminer.

DÉMARCHE AVANCÉE

1. Définir l'activité d'un échantillon de noyaux radioactifs.

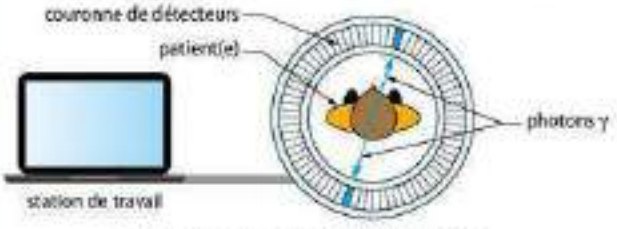
2. Montrer que l'expression de l'activité peut s'écrire $A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$.

3. À quelle heure l'examen va-t-il se terminer ?

35 Tomographie par émission de positons

Les neurobiologistes peuvent suivre avec la technique de tomographie par émission de positons TEP, les variations du flux sanguin, lesquelles reflètent l'activité du cerveau. Le principe de cette technique est d'injecter au patient par voie intraveineuse de l'eau radioactive. En TEP, on détecte les molécules d'eau radioactives présentes dans le cerveau. Dans ces molécules d'eau, le noyau d'oxygène qui comprend normalement 8 protons et 8 neutrons est remplacé par un noyau d'oxygène 15, émetteur de positons β^+.

Avec la TEP, on cherche à repérer les photons qui traversent en grande partie le cerveau et le crâne, de sorte que l'on peut les détecter en dehors de la boîte crânienne. Le dispositif de détection, la caméra à positons, entoure la tête du sujet.



Dispositif pour une tomographie TEP

Après l'analyse mathématique, on obtient une série de « coupes » contiguës du cerveau qui représentent la concentration en noyaux d'oxygène 15 en chaque point du cerveau, ce qui reflète le débit sanguin local.

Le temps de demi-vie de ces noyaux émetteurs de positons est bref, il est de 123 s. Cette propriété est importante chez l'Homme car d'une part l'irradiation subie par les sujets est faible et d'autre part, cette radioactivité disparaissant rapidement, on peut effectuer plusieurs études chez le même sujet. Cette courte durée de vie impose néanmoins que l'eau radioactive soit préparée dans les minutes qui précèdent son injection, et que deux injections successives soient espacées de 8 à 10 min.

Données : ${}^{15}_{6}C$; ${}^{15}_{7}N$; ${}^{15}_{8}O$; ${}^{15}_{9}F$.

1. Écrire l'équation de la réaction de désintégration du noyau d'oxygène 15. Le noyau fils n'est pas produit dans un état excité.

2. Définir le temps de demi-vie $t_{1/2}$ d'un échantillon radioactif.

3. L'évolution temporelle du nombre de noyaux d'oxygène 15 est donnée par la loi de décroissance radioactive où N_0 est le nombre de noyaux d'oxygène 15 au moment de l'injection de l'eau radioactive à l'instant de date $t = 0$ s.

a. À partir de cette loi, montrer que la constante radioactive λ a pour expression :

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$

b. Calculer sa valeur.

4. Si l'on souhaite poursuivre l'examen par TEP, on estime qu'il est nécessaire de procéder à une nouvelle injection lorsque le nombre $N(t_1)$ de noyaux d'oxygène 15 restants à l'instant de date t_1 est de l'ordre de 5 % du nombre N_0 de noyaux initialement injectés. Calculer la valeur de la date t_1.

5. Justifier la durée entre les deux injections, évoquée dans l'énoncé.

36 Quel âge ?

Le chlore 36 se désintègre essentiellement en argon 36. Son temps de demi-vie est $3{,}01 \times 10^5$ ans. L'étude de cet isotope radioactif renseigne sur la durée du transit souterrain d'une eau, c'est-à-dire l'âge de la nappe phréatique.

Les ions chlorure Cl^- (aq) sont presque toujours présents dans les eaux minérales naturelles.

Dans les eaux de surface, le chlore 36 est renouvelé et la teneur en chlore 36 peut être supposée constante, ce qui n'est pas le cas dans les eaux souterraines.

Données : *${}_{17}Cl$; ${}_{18}Ar$; relation entre le temps de demi-vie $t_{1/2}$ et la constante radioactive λ :* $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$.

1. Écrire l'équation de la réaction de désintégration d'un noyau de chlore 36, en précisant :
- les lois utilisées ;
- le type de radioactivité mise en jeu.

2. Pourquoi le chlore 36 est-il particulièrement adapté pour dater géologiquement les eaux souterraines sur une durée de soixante mille à un million d'années ?

3. Déterminer à partir d'une formule la définissant, l'unité de la constante radioactive λ dans le Système international.

4. Calculer sa valeur en respectant l'unité de base du Système international.

5. On considère un échantillon, de volume V donné, d'eau souterraine.
On note :
- N_0 le nombre moyen de noyaux de chlore 36 présents dans l'échantillon à l'instant de date $t_0 = 0$ s de la constitution de la nappe phréatique ;
- $N(t)$ le nombre moyen de noyaux de chlore 36 présents dans l'eau extraite aujourd'hui de cette nappe, donc non renouvelée en chlore 36.

Écrire la loi de décroissance radioactive liant $N(t)$ et N_0.

6. On admet que N_0 est égal au nombre moyen de noyaux de chlore 36 présents dans un échantillon de même volume V d'eau de surface. Déduire de la loi de décroissance écrite précédemment l'âge d'une nappe phréatique dont l'eau non renouvelée ne contient plus que 38 % du nombre de noyaux de chlore 36 trouvés dans les eaux de surface.

JE VÉRIFIE QUE J'AI...
- bien utilisé la relation entre λ et $t_{1/2}$.

À L'ORAL

37 Dangerosité des rayonnements

Préparer un exposé oral permettant d'expliquer l'animation suivante :

ANIMATION
Dangerosité des rayonnements radioactifs



Ce court exposé devra pouvoir être réalisé sans note écrite.

Les mots-clés à utiliser
- radioactivité α, β, γ
- rayonnement ionisant
- écran
- matériau absorbant

38 RETOUR SUR LA PAGE D'OUVERTURE

Pour comprendre les modes de vie des populations anciennes, les archéologues ont besoin entre autres de connaître l'âge des objets qu'ils mettent à jour sur les chantiers.



Préparer un exposé oral expliquant comment les scientifiques peuvent dater les ossements découverts par les archéologues lors des chantiers de fouilles.

À la date de publication de ce manuel, les notions enseignées dans ce chapitre sont exclues de l'épreuve écrite.

PRÉPA BAC

Développer ses compétences

39 Enquête préhistorique — RÉSOLUTION DE PROBLÈME

50 min

ANALYSER Proposer une stratégie de résolution

Dans leurs travaux, il n'est pas rare que les scientifiques adoptent une démarche d'investigation et les enquêtes menées sont dignes des meilleurs limiers.

DOC 1 Une découverte* exceptionnelle

« Les travaux de la future station hivernale ont révélé un site d'une richesse inattendue qui suscite l'enthousiasme des plus grands spécialistes mondiaux de la paléoanthropologie.

C'est en préparant les fondations du téléphérique transfrontières qu'a été exhumé [...] le premier fragment fossile : un crâne pratiquement complet apparenté au genre HOMO, de l'espèce SAPIENS NEANDERTHAL. On l'a "baptisé" du nom d'ANDER.

Les autorités ont suspendu les projets d'aménagement pour permettre l'étude de ce site. Depuis lors les équipes de fouille sont allées de surprise en surprise. On a exhumé le squelette partiel d'ANDER mais aussi d'un autre fossile inattendu, SAPIAND : un HOMO de l'espèce SAPIENS SAPIENS.

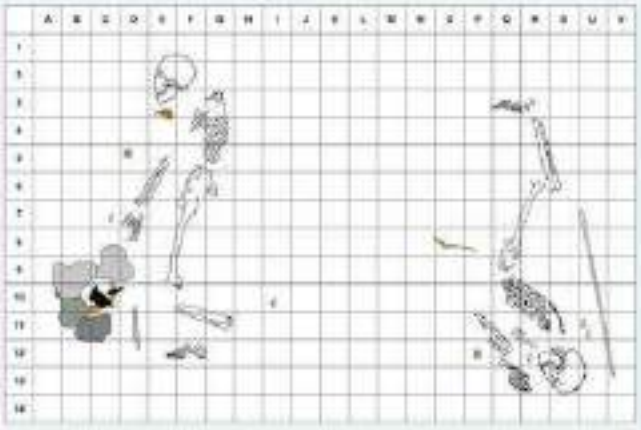
On sait que ces deux espèces d'hominidés ont cohabité en Europe entre −60 000 et −30 000 ans, mais la découverte de ces deux individus, dans un tel état de conservation, est exceptionnelle. De plus, les deux fossiles sont séparés d'à peine deux mètres de distance [...]. [Il semblerait que SAPIAND et ANDER aient vécu au même endroit].

Les spécialistes s'interrogent :

ces deux individus se sont-ils réellement rencontrés ?

Et la question prend la dimension d'une enquête policière puisque ANDER présente manifestement les signes [crâniens] d'une mort violente ! »

* *Attention : cette histoire est fictive.*



Ce document est extrait du relevé de fouilles.

DOC 2 Deux isotopes du carbone

Dans la nature, le carbone existe sous forme de deux noyaux isotopes : ${}^{12}_{6}C$ et ${}^{14}_{6}C$.

Dans la haute atmosphère, un neutron (formé par l'action de rayons cosmiques) bombarde un noyau d'azote 14 (${}^{14}_{7}N$) qui se transforme en carbone 14 radioactif β^- avec émission d'une autre particule.

Le temps de demi-vie $t_{1/2}$ du carbone 14 est de 5 730 ans.

Tant que la matière est vivante, les échanges de l'organisme animal ou végétal impliquant le dioxyde de carbone atmosphérique font que le quotient $\frac{N({}^{14}_{6}C)}{N({}^{12}_{6}C)}$ est constant.

À la mort de l'être vivant, la fin de ces échanges entraîne la décroissance de ce quotient.

DOC 3 Résultats d'analyse

Les résultats de l'analyse des ossements d'ANDER et de SAPIAND par la méthode du carbone 14 sont consignés dans le tableau suivant.

	Échantillons sélectionnés	
	 Ossements ANDER	 Ossements SAPIAND
$\frac{N}{N_0}$	$1{,}64 \times 10^{-2}$	$1{,}87 \times 10^{-2}$

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Quelle méthode peut-on envisager pour répondre au problème posé ?
2. Écrire l'équation de la réaction nucléaire correspondant à la formation de carbone 14 dans la haute atmosphère. Identifier la particule émise en justifiant la réponse.
3. Écrire l'équation de désintégration β^- du carbone 14.
4. Établir l'équation différentielle donnant le nombre de noyaux $N(t)$ en fonction du temps.

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

SAPIAND a-t-il pu assassiner ANDER ?

Il est attendu une prise d'initiatives, une présentation de la démarche suivie même s'il elle n'a pas abouti, et de justifier toute réponse.

À la date de publication de ce manuel, les notions enseignées dans ce chapitre sont exclues de l'épreuve écrite.

40 Examen du cœur

RÉSOLUTION DE PROBLÈME

50 min

AR/RAI Proposer une stratégie de résolution

Des techniques d'imagerie médicale faisant appel à des traceurs radioactifs permettent d'établir un diagnostic et de déceler les problèmes cardiaques.

DOC 1 Un diagnostic à poser

Un patient se plaint de douleurs thoraciques. Son médecin cardiologue lui explique les causes à l'origine de ces douleurs :

– soit des cellules qui constituent le muscle cardiaque sont détruites, ce qui correspond à un infarctus du myocarde ;

– soit les cellules sont encore vivantes, mais souffrent de manque d'oxygène dû à une réduction de l'irrigation sanguine, ce qui correspond à une ischémie coronaire.

Le médecin prescrit à ce patient une scintigraphie myocardique.

DOC 2 Scintigraphie myocardique

Une scintigraphie myocardique est une technique d'imagerie nucléaire au cours de laquelle du thallium 201 est injecté par voie intraveineuse au patient. Celui-ci a une masse de 70 kg, donc il reçoit une injection de solution de chlorure de thallium 201 d'activité initiale $A_0 = 78$ MBq.

Après cette injection, le patient doit produire un effort lors d'un exercice physique pendant lequel on enregistre les images de son cœur.

Le thallium 201, obtenu suite à la désintégration radioactive β^+ du plomb 201, est un émetteur radioactif gamma. Il n'est fixé que par les cellules vivantes du cœur et son rayonnement est alors détecté par une gamma caméra.

On peut visualiser les premières images du cœur quelques minutes seulement après l'injection et on estime que les résultats de l'examen sont exploitables tant que l'activité du traceur est supérieure à 3 MBq.

Données :

- ${}_{82}^{201}Pb$; ${}_{81}^{201}Tl$.
- *Loi de décroissance radioactive :* $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$.
- *Constante radioactive du thallium 201 :* $\lambda_{Tl} = 2{,}6 \times 10^{-6}\ s^{-1}$.



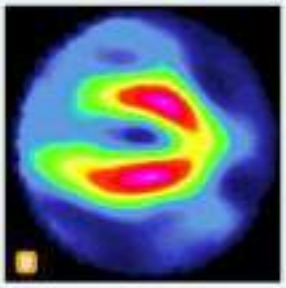
DOC 3 Images obtenues

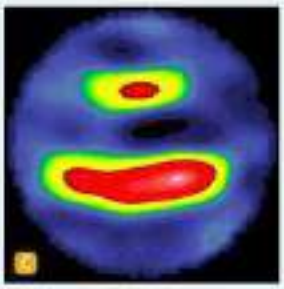
Sur les images obtenues lors d'une scintigraphie du myocarde, les zones rouges représentent les cellules saines du cœur qui fixent le thallium 201.

Les images de ce document sont les résultats de scintigraphies myocardiques effectuées sur trois patients (A, B, C) différents pendant un effort.

Seul le patient A est en parfaite santé.







QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Écrire l'équation de la désintégration du noyau de plomb 201 en thallium 201. On suppose que le noyau fils n'est pas émis dans un état excité.

2. Que diagnostique le médecin pour les patients B et C : une ischémie coronaire ou un infarctus du myocarde ?

3. Définir l'activité d'un échantillon radioactif à l'aide d'une phrase, puis d'une formule.

4. Montrer que le nombre initial de noyaux N_0 de thallium 201, reçus par le patient, vaut $3{,}0 \times 10^{13}$.

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

Le patient doit refaire l'examen huit jours plus tard. Une nouvelle injection de solution radioactive est-elle nécessaire ?

Il est attendu une prise d'initiatives, une présentation de la démarche suivie même s'il elle n'a pas abouti, et de justifier toute réponse.

À la date de publication de ce manuel, les notions enseignées dans ce chapitre sont exclues de l'épreuve écrite.

Retrouvez des exercices de synthèse p. 232

PRÉPA BAC

30 min

41 Marie et Pierre Curie

ANALYSE ET SYNTHÈSE DE DOCUMENTS

APP Rechercher et organiser l'information

Marie et Pierre Curie, puis leur fille Irène et son mari, ont consacré leur vie à la science, ils ont été récompensés par trois prix Nobel pour leurs travaux sur la radioactivité.

DOC 1 La radioactivité naturelle



Les travaux d'Henri Becquerel sur l'uranium ont permis à Marie et Pierre Curie de découvrir en 1898 la propriété qu'ont certains éléments lourds d'émettre spontanément un rayonnement.

Marie Curie donna le nom de radioactivité à cette propriété persistante dans tous les états chimiques et physiques de la matière.

Également en 1898, ils annoncèrent la découverte de deux nouveaux éléments radioactifs : le polonium et le radium.

Leurs travaux ont été couronnés par deux prix Nobel, l'un en 1903 avec Henri Becquerel, l'autre en 1911.

DOC 2 La radioactivité artificielle

Irène et Frédéric Joliot-Curie ont découvert en 1934 la radioactivité artificielle, ce qui leur a valu le prix Nobel de physique en 1935.

Ils ont notamment réussi la synthèse du phosphore 30 ($^{30}_{15}P$), isotope radioactif du phosphore 31 ($^{31}_{15}P$).

Le phosphore 30, produit artificiellement, se transforme spontanément par désintégration β^+ en silicium 30 ($^{30}_{14}Si$), noyau obtenu directement dans son état fondamental.

La diversité des radioéléments artificiels a permis leur utilisation dans les domaines les plus variés : la médecine, la biologie, l'astrophysique, la géophysique, la radiothérapie, la datation...

DOC 3 Données sur le radium

- Le noyau de radium $^{226}_{88}Ra$ se désintègre spontanément en donnant un noyau de radon $^{222}_{86}Rn$ lui-même radioactif.

Cette désintégration s'accompagne de l'émission d'un rayonnement γ.

- Le temps de demi-vie du radium est :

$$t_{1/2} = 1{,}58 \times 10^3 \text{ années}$$

ANALYSE

1. **a.** Écrire l'équation de la réaction de désintégration du radium et préciser le type de radioactivité en jeu.
b. Expliquer la présence du rayonnement γ émis. Quelle information cette présence fournit-elle sur le noyau ?

2. **a.** Écrire l'équation de la désintégration du phosphore 30.
b. Y a-t-il émission d'un rayonnement ? Justifier la réponse.

3. Au bout de combien de temps, $\frac{3}{4}$ des noyaux d'un échantillon de radium seront-ils désintégrés ?

SYNTHÈSE

Quelle est la différence entre la radioactivité naturelle et la radioactivité artificielle ?

VERS LE SUP'

42 Roche lunaire

Lors des missions Apollo XI et les suivantes, du matériel scientifique a été déployé à la surface de la Lune afin de l'étudier. Des échantillons de roche lunaire ont également été ramenés sur Terre par les astronautes (photo).

Pour déterminer l'âge de ces échantillons, les physiciens ont employé des méthodes de datation reposant sur la décroissance radioactive de certains radioéléments. Ils ont mesuré les quantités relatives d'argon 40 gazeux et de potassium 40 solide, emprisonnés dans la roche.

1. Le potassium 40 ($^{40}_{19}K$) est un isotope radioactif. Il se désintègre en produisant de l'argon 40 ($^{40}_{18}Ar$).
Écrire l'équation de désintégration nucléaire d'un noyau de potassium 40. De quelle radioactivité s'agit-il ?

2. Donner l'expression du nombre $N_K(t)$ de noyaux radioactifs de potassium 40 présents dans l'échantillon de roche lunaire à l'instant de date t en fonction du nombre initial N_{K0} de ces noyaux.

3. **a.** Donner la définition du temps de demi-vie $t_{1/2}$ d'un échantillon radioactif.
b. Établir la relation entre la constante radioactive λ et le temps de demi-vie $t_{1/2}$.
c. Montrer que $\lambda = 5{,}50 \times 10^{-10}$ an^{-1} pour le potassium 40 sachant que $t_{1/2} = 1{,}26 \times 10^9$ ans.

4. Un échantillon de 1,0 g de roche lunaire, analysé à l'instant de date t, contient $N_{Ar}(t)$ noyaux d'argon 40 et $N_K(t)$ noyaux de potassium 40 égaux à :
$N_{Ar}(t) = 2{,}3 \times 10^{17}$ et $N_K(t) = 2{,}4 \times 10^{16}$.
Calculer l'âge de cette roche lunaire. On admet que le potassium 40 ne subit que la désintégration citée dans la question 1 et que la roche lunaire ne contenait pas d'argon 40 au moment de sa formation.



Mission Apollo XVII

À la date de publication de ce manuel, cette capacité expérimentale est exclue de l'épreuve pratique.

Décroissance radioactive

Contexte

On souhaite étudier l'évolution temporelle d'une population de noyaux radioactifs.

La manipulation de sources radioactives présentant des risques pour la santé, elle sera seulement simulée à l'aide d'un programme informatique.



Documents mis à disposition

DOC 1 **Compteur Geiger-Müller**

Le compteur Geiger-Müller, datant de 1928, met en évidence un rayonnement radioactif. Pendant une durée de comptage donnée, il détecte et comptabilise les désintégrations issues d'une source radioactive. On suppose que cette source radioactive contient un nombre initial de noyaux $N_0 = 1{,}0 \times 10^5$.

Matériel mis à disposition

- Un ordinateur muni de la console et d'un éditeur Python

DOC 2 **Approche de la radioactivité par Python**

```
N=int(input('Nombre initial de noyaux: N0= '))  # entrer le nombre initial N0 de noyaux radioactifs
L=[ ]  # crée une liste avec le nombre de noyaux radioactifs restants
while N>0:
    L.append(N)          # tant qu'il reste des noyaux radioactifs
    s=0                  # la valeur de N est ajoutée à la liste L
    for i in range(N):   # crée un compteur initialisé à 0
        if randint(1,50)==1:  # si un noyau se désintègre (probabilité 1/50)
            s=s+1             # le compteur ajoute +1
    N=N-s                # N est le nombre de noyaux radioactifs restants
print('Nombre de noyaux restants: N = ',L)  # affiche la liste contenant les noyaux radioactifs restants
t=[i for i in range(len(L))]  # crée une liste "temps" de même dimension que la liste L
plt.scatter(t,L, color='blue')  # affiche un nuage de points avec les listes t en abscisse et L en ordonnée
plt.show()  # affiche le graphique
```

Travail à effectuer

1. (ANAL) **Proposition de protocole expérimental** *(10 min conseillées)*

■ À partir des documents, proposer un protocole expérimental qui permettrait de suivre l'évolution d'une population de noyaux radioactifs.

Être en mesure de présenter le protocole

2. (REA) **Mise en œuvre d'une simulation** *(20 min conseillées)*

1. Dans la console Python, ouvrir le programme « Décroissance radioactive ».
2. Exécuter ce programme afin de modéliser la courbe donnant le nombre $N(t)$ de noyaux radioactifs restants à l'instant de date t.

Être en mesure de présenter la courbe

3. (ANAL) (VAL) **Exploitation du résultat obtenu** *(30 min conseillées)*

L'équation différentielle qui régit l'évolution temporelle d'une population de noyaux radioactifs est :

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda \cdot N(t)$$

$N(t)$ est le nombre de noyaux restants à l'instant de date t ;
λ est la constante radioactive (en s^{-1}).

1. Résoudre cette équation différentielle et donner l'expression de $N(t)$.
2. L'expression obtenue est-elle en accord avec la modélisation expérimentale ?
3. À partir de la courbe obtenue, déterminer le temps de demi-vie de l'élément radioactif.
4. Identifier la principale cause d'incertitude sur ce résultat.

PISTE POUR LE GRAND ORAL PRÉPA BAC

Pour se préparer à l'Oral
➥ Livret LES CLÉS DU BAC
(en début de manuel)

UNE QUESTION

Comment se protéger des effets de la radioactivité ?

Enjeu de la question

Nous sommes exposés en permanence à des sources de radioactivité naturelle et artificielle. Ces rayonnements peuvent provoquer des effets sur l'organisme, différents en fonction du type de rayonnement et de la dose reçue.

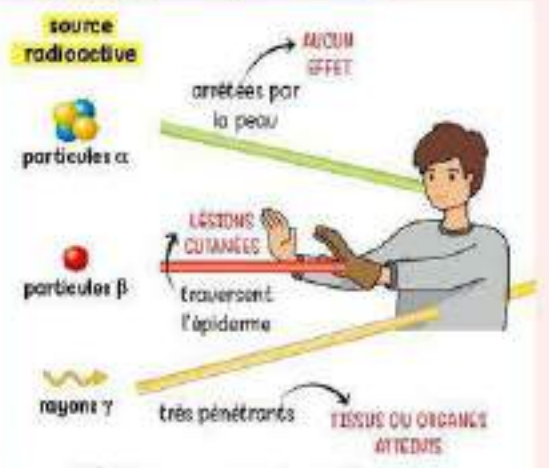
Proposition de plan de présentation

1. Origine de la radioactivité
2. Différents types de radioactivité
3. Ionisation des molécules du vivant et conséquences
4. Protection contre les rayonnements ionisants
   - Mesures à adopter
   - Facteurs à prendre en compte

Les mots-clés

instabilité ▸ source ▸ radioactivité α, β, γ ▸ activité ▸ compteur Geiger-Müller ▸ écran

Exemple de support de présentation



Effet des rayonnements sur l'organisme

QUESTIONS D'APPROFONDISSEMENT POSSIBLES



UN EXEMPLE DE PROJET PROFESSIONNEL

Spécialiste de la prévention des risques dans le domaine de la radioactivité, l'**ingénieure radioprotection** est responsable des mesures destinées à assurer la protection de la population, des travailleurs et de l'environnement face aux rayonnements ionisants.

Après le bac : *Bac + 5, diplôme d'ingénieur(e) spécialisé(e) ou master en énergie nucléaire, risques et environnement…*
Autres métiers : *ingénieur(e) nucléaire, ingénieur(e) environnement, technicien(ne) radioprotection, chargé(e) d'hygiène, sécurité, environnement.*

Garante de la sécurité dans les centrales nucléaires, l'ingénieure radioprotection conçoit la politique de prévention du site. En ingénierie, elle est chargée d'adapter et d'améliorer les moyens et outils de mesure et de prévention.

En cas d'incident, elle réagit immédiatement en proposant des solutions adaptées pour éviter toute contamination.



Sens d'évolution

Avant d'aborder le chapitre EN AUTONOMIE

LES ACQUIS INDISPENSABLES

1re Enseignement de spécialité — Chapitre 1

- Une **demi-équation** électronique relie l'**oxydant** et le **réducteur** d'un couple oxydant-réducteur.

$$Ox + ne^- = Red$$

n : nombre d'électrons échangés

- Au cours d'une **réaction d'oxydoréduction**, il y a un transfert d'électrons entre l'oxydant d'un couple et le réducteur d'un autre couple oxydant-réducteur. L'**équation de la réaction** est obtenue en combinant les demi-équations électroniques des couples mis en jeu de façon à égaliser les électrons cédés ou captés.

$$(Ag^+(aq) + e^- = Ag(s)) \times 2$$
$$Fe(s) = Fe^{2+}(aq) + 2\,e^-$$
$$2\,Ag^+(aq) + Fe(s) \rightarrow 2\,Ag(s) + Fe^{2+}(aq)$$

- Certaines **transformations** chimiques sont **totales**. Dans ce cas, un des réactifs est totalement consommé, on a :

$$x_f = x_{max}$$

Si les réactifs ne sont pas entièrement consommés, on parle de réaction **non totale**. Dans ce cas, on a : $x_f < x_{max}$ et on utilise une double flèche $\rightleftarrows$ dans l'équation de la réaction.

- Au cours d'une **réaction acide-base**, il y a un transfert d'ion hydrogène H^+ entre l'acide d'un couple et la base d'un autre couple acide-base.

$$HCO_2H(aq) + NH_3(aq) \rightleftarrows HCO_2^-(aq) + NH_4^+(aq)$$

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

Pour chaque situation, rédiger une réponse qui explique en quelques lignes le raisonnement.

SITUATION 1

Ces « végétations métalliques », se forment lors de la transformation dont l'équation de réaction est :

$$Zn(s) + Pb^{2+}(aq) \rightleftarrows Zn^{2+}(aq) + Pb(s)$$



S'agit-il d'une transformation modélisée par une réaction d'oxydoréduction ou acide-base ?

SITUATION 2

Une solution d'acide éthanoïque a un pH égal à 3,5.

Quelle est la valeur de $[H_3O^+(aq)]$, la concentration en quantité de matière d'ions H_3O^+ ?

SITUATION 3

Équation de réaction		$NaCl(s) \rightleftarrows Na^+(aq) + Cl^-(aq)$		
État du système	**Avancement** (mol)	n(NaCl) (mol)	$n(Na^+)$ (mol)	$n(Cl^-)$ (mol)
initial	$x = 0$	20	0	0
intermédiaire	x	$20 - x$	x	x
final	$x_f = 6$	14	6	6
maximal	$x_{max} = 20$	0	20	20

Ce tableau d'avancement correspond-il à une transformation totale ou non totale ?

CHAPITRE

6

CHIMIE

spontanée d'un système



Les deux petites électrodes de cette biopile transforment le glucose et le dioxygène du sang en électricité. Pourquoi dit-on qu'elle est une source d'énergie inépuisable ?

→ EXERCICE 42

NOTIONS ET CONTENUS

- Réactions non totales : modèle de l'équilibre dynamique.
- Quotient de réaction Q_r et constante d'équilibre $K(T)$; critère d'évolution spontanée.
- Fonctionnement d'une pile.
- Oxydants et réducteurs usuels.

CAPACITÉS EXPÉRIMENTALES

- Mettre en évidence la présence de tous les réactifs dans l'état final d'un système, siège d'une transformation non totale. → Activité 1
- Montrer l'indépendance du quotient de réaction à l'état final d'un système, siège d'une transformation non totale, vis-à-vis de la composition initiale du système à une température donnée. → Activité 2
- Illustrer un transfert spontané d'électrons par contact entre les réactifs et par l'intermédiaire d'un circuit extérieur. → Activité 3
- Réaliser une pile et interpréter son fonctionnement. → Activité 3

1. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE

TP

COMPÉTENCES :
VAL Interpréter des mesures
XXX à venir

À la recherche des réactifs disparus

Au cours d'une transformation chimique, des réactifs disparaissent et des produits apparaissent. Cette transformation cesse lorsque le réactif limitant est totalement consommé. Est-ce toujours le cas ?

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

- Dans un bécher n° 1, verser 10,0 mL de solution aqueuse de nitrate de plomb (Pb^{2+} (aq), NO_3^- (aq)) à $1{,}00 \times 10^{-1}$ mol · L^{-1}, puis ajouter 20,0 mL de solution aqueuse d'iodure de potassium (K^+ (aq), I^- (aq)) à $1{,}00 \times 10^{-1}$ mol · L^{-1}.
La réaction est quasi instantanée.
- Filtrer le précipité obtenu et récupérer le filtrat incolore dans un erlenmeyer.
- Verser la moitié du filtrat dans un bécher n° 2 et l'autre moitié dans un bécher n° 3.
- Dans le bécher n° 2, ajouter quelques mL de solution aqueuse de chromate de potassium ($2\,K^+$ (aq), CrO_4^{2-} (aq)) et observer.
- Dans le bécher n° 3, ajouter quelques mL de solution aqueuse de nitrate d'argent (Ag^+ (aq), NO_3^- (aq)) et observer.

DOC 1 La transformation étudiée

Lorsque l'on mélange une solution aqueuse incolore de nitrate de plomb (Pb^{2+} (aq), $2\,NO_3^-$ (aq)) et une solution aqueuse incolore d'iodure de potassium (K^+ (aq), I^- (aq)), on observe la formation d'un précipité jaune d'iodure de plomb PbI_2 (s).

Cette transformation peut être modélisée par une réaction d'équation :

$$Pb^{2+}\,(aq) + 2\,I^-\,(aq) \rightarrow PbI_2\,(s)$$



DOC 2 Tests de reconnaissance des ions plomb Pb^{2+} (aq) et iodure I^- (aq)

Ion recherché	Réactif à ajouter	Observation
Pb^{2+} (aq)	Chromate de potassium ($2\,K^+$ (aq), CrO_4^{2-} (aq)) à 0,10 mol · L^{-1}	Formation d'un précipité jaune de $PbCrO_4$ (s)
I^- (aq)	Nitrate d'argent (Ag^+ (aq), NO_3^- (aq)) à 0,10 mol · L^{-1}	Formation d'un précipité jaune très clair de AgI (s)

EXPÉRIENCE ET EXPLOITATION

1 a. Mettre en œuvre le protocole.

b. Dans le bécher n° 1, les réactifs de la réaction du document 1 sont-ils introduits dans les proportions stœchiométriques ? Quel est alors le réactif limitant ?

c. Si l'on suppose que cette réaction est totale, déterminer la composition du filtrat obtenu.

d. Comment appelle-t-on des espèces chimiques présentes dans le milieu réactionnel, mais qui n'interviennent pas dans l'équation de la réaction ? Les identifier.

2 D'après les observations faites dans le bécher n° 2, restait-il des ions Pb^{2+} (aq) dans le filtrat ?

3 D'après les observations faites dans le bécher n° 3, restait-il des ions I^- (aq) dans le filtrat ?

4 a. Les réponses aux questions 2 et 3 sont-elles en accord avec la réponse à la question 1 b. ? Pourquoi ?

b. Que met-on en évidence avec cette expérience ?

CONCLUSION

5 a. Une réaction chimique est-elle toujours totale (arrêt de la réaction lorsqu'au moins un réactif est totalement consommé) ? Qu'est-ce qui pourrait permettre de l'expliquer ?

b. Émettre une ou plusieurs hypothèse(s).

Je réussis si...

- **Je sais montrer qu'un mélange est stœchiométrique.**
- **Je sais prévoir la composition d'un système dans l'état final dans le cas d'une réaction totale.**
- **Je sais justifier le caractère non total d'une transformation chimique.**

TP

COMPÉTENCES
REA Mettre en œuvre un protocole expérimental
VAL Estimer une incertitude

État final d'un système

Les valeurs du taux d'avancement final et de la constante d'équilibre dépendent-elles de la composition initiale du système ?

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

On dispose d'une solution aqueuse d'acide éthanoïque de concentration en quantité de matière $c_1 = 0{,}10\ mol \cdot L^{-1}$, appelée solution S_1.

- Prélever $V_1 = 100{,}0\ mL$ de cette solution, les verser dans un bécher et mesurer la conductivité σ_1.
- Par dilution, préparer $V_2 = 100{,}0\ mL$ d'une solution aqueuse d'acide éthanoïque de concentration $c_2 = 0{,}010\ mol \cdot L^{-1}$ (FICHE PRATIQUE ➥ p. 571).
- Mesurer la conductivité σ_2 de cette solution S_2.



DOC 1 La transformation étudiée

Lorsque l'on mélange de l'acide éthanoïque CH_3CO_2H (ℓ) et de l'eau H_2O (ℓ), il se produit une transformation acide-base modélisée par une réaction d'équation :

$$CH_3CO_2H\ (\ell) + H_2O\ (\ell) \rightleftarrows CH_3CO_2^-\ (aq) + H_3O^+\ (aq)$$

DOC 2 Loi de Kohlrausch

La conductivité σ d'une solution aqueuse contenant plusieurs ions se calcule en utilisant la formule suivante :

$$\sigma = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \cdot [X_i]$$

- σ : conductivité (en $mS \cdot m^{-1}$)
- $[X_i]$: concentration en quantité de matière d'ions X_i (en $mol \cdot m^{-3}$)
- λ_i : conductivité molaire ionique de l'ion X_i (en $mS \cdot m^2 \cdot mol^{-1}$)

Données : *conductivités molaires ioniques*

$\lambda_{CH_3CO_2^-} = 4{,}1\ mS \cdot m^2 \cdot mol^{-1}$; $\lambda_{H_3O^+} = 35\ mS \cdot m^2 \cdot mol^{-1}$.

EXPÉRIENCE ET EXPLOITATION

1 a. Mettre en œuvre le protocole.

Recopier le tableau suivant et y noter les valeurs des conductivités mesurées par chaque groupe d'élèves (G_1, G_2...), puis compléter les trois dernières colonnes (FICHE PRATIQUE ➥ p. 573).

	G_1	G_2	G_3	...	Moyenne $\bar{\sigma}$	Écart-type s_σ	Incertitude-type u_σ
σ_1							
σ_2							

b. Comment expliquer la dispersion des résultats ? Cette dispersion est-elle satisfaisante ?

Pour la suite, on admettra que la meilleure valeur de la conductivité à retenir est la valeur moyenne $\bar{\sigma}$.

2 Établir, pour chacune des solutions S_1 et S_2, un tableau d'avancement (distinguer état final et état maximal).

3 Recopier et compléter le tableau suivant en utilisant les tableaux d'avancement établis et les mesures de conductivités σ_1 et σ_2.

4 Comparer les valeurs du taux d'avancement final τ et de la constante d'équilibre $K(T)$ obtenues pour S_1 et S_2.

	Solution S_1	Solution S_2
$[H_3O^+(aq)]_f$		
$[CH_3CO_2^-(aq)]_f$		
$[CH_3CO_2H(aq)]_f$		
$\tau = \dfrac{[CH_3CO_2^-(aq)]_f}{[CH_3CO_2H(aq)]_i}$		
$K(T) = \dfrac{[CH_3CO_2^-(aq)]_f \cdot [H_3O^+(aq)]_f}{[CH_3CO_2H(aq)]_i}$		

CONCLUSION

5 a. La transformation chimique étudiée est-elle totale ?

b. τ et $K(T)$ dépendent-ils de la composition initiale du système ?

Je réussis si...

- **Je sais calculer une moyenne, un écart-type, une incertitude-type, et discuter de l'influence de l'instrument de mesure et du protocole.**
- **Je sais prévoir la composition d'un système dans l'état final.**
- **Je sais déterminer la valeur de $K(T)$ à l'état final et montrer si elle dépend, ou non, de la composition initiale du système.**

TP

COMPÉTENCES :
(RÉA) Utiliser un modèle
(VAL) Confronter un modèle à des résultats expérimentaux

Réalisation d'une pile

Une pile est un dispositif qui transforme de l'énergie chimique en énergie électrique. Comment fabriquer une pile et déterminer ses caractéristiques de fonctionnement ?

PARTIE 1 Transfert d'électrons par contact entre les réactifs

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

- Dans un tube à essais, introduire environ 5 mL de solution de sulfate de cuivre (Cu^{2+} (aq), SO_4^{2-} (aq)) et environ 5 mL de solution de sulfate de zinc (Zn^{2+} (aq), SO_4^{2-} (aq)) de même concentration en quantité de matière $c = 1{,}0\ mol \cdot L^{-1}$.
- Plonger ensuite le thermomètre dans la solution. Attendre quelques secondes que la température se stabilise, puis noter sa valeur. Laisser le thermomètre à l'intérieur du tube pour la suite des expériences.
- Ajouter un ou deux copeau(x) de cuivre Cu (s).
- Noter ses observations.
- Ajouter une pointe de spatule de poudre de zinc Zn (s) et laisser décanter.
- Noter ses observations.

DOC 2 Données

Couples oxydant-réducteur :
- Cu^{2+} (aq) / Cu (s) ;
- Zn^{2+} (aq) / Zn (s) ;
- SO_4^{2-} (aq) / SO_2 (g).

DOC 1 Aide à l'interprétation

A
Ions cuivre
Cu^{2+} (aq)
responsables de la couleur bleue des solutions qui les contiennent



B
Cuivre métallique
Cu (s)
métal de couleur rouge-orangée



C
Zinc métallique
Zn (s)
métal de couleur grise



D
Ions zinc
Zn^{2+} (aq)
incolores en solution



EXPÉRIENCE ET EXPLOITATION

1 Mettre en œuvre le protocole expérimental.
Observer le contenu du tube à essais et noter ce qui se passe : apparition ou disparition d'espèces chimiques solides, leur couleur, éventuels changements de coloration du liquide...

2 Qu'observe-t-on lors de l'ajout :
a. de copeaux de cuivre ?
b. de poudre de zinc ?

3 a. Quels sont les ions présents dans le tube à essais après y avoir ajouté les deux solutions ?
b. Identifier les espèces chimiques qui semblent impliquées dans la transformation chimique observée et citer les couples oxydant-réducteur.
c. En exploitant les observations faites, écrire les demi-équations correspondant aux couples mis en jeu, ainsi que l'équation d'oxydoréduction associée à la transformation.

4 Que dire de l'évolution de la température ? Proposer une interprétation.

CONCLUSION

5 a. Calculer la valeur du quotient de réaction initial.
b. Rappeler le critère d'évolution spontanée.
c. Pour cette réaction, $K(T) = 2 \times 10^{37}$. Montrer que le critère d'évolution spontanée est en accord avec les observations expérimentales.

PARTIE 2 Fonctionnement d'une pile

VIDÉO Réalisation d'une pile

DOC 3 Réalisation d'une pile en circuit ouvert



* bande de papier-filtre imbibée de solution aqueuse de nitrate de potassium ($K^+(aq)$, $NO_3^-(aq)$).

DOC 4 Réalisation d'une pile en circuit fermé

Aucun courant ne circule dans la pile en circuit ouvert car un voltmètre ne laisse pas passer le courant électrique. Pour que des électrons puissent être échangés entre les réactifs, il faut fermer le circuit électrique. Pour cela, entre les deux électrodes, on insère en série un conducteur ohmique de résistance 100 Ω et un ampèremètre. Celui-ci est branché de manière à indiquer une intensité du courant positive.

DOC 5 Du matériel utile

- Lame de plomb.
- Solution de nitrate de plomb ($Pb^{2+}(aq)$, $NO_3^-(aq)$) de concentration en quantité de matière $c = 1{,}0\ mol \cdot L^{-1}$.
- Bécher.

EXPÉRIENCE ET EXPLOITATION

1 La pile en circuit ouvert

a. Réaliser la pile cuivre-zinc (doc. 3) et en faire un schéma détaillé.

b. Sur quelle lame la borne COM du multimètre est-elle reliée lorsque la valeur lue est positive ? En déduire la borne + de la pile.

c. Donner la valeur de la tension à vide de cette pile.

2 La pile en circuit fermé

a. Réaliser la pile décrite (doc. 4) et en faire un schéma détaillé.

b. Donner la valeur de l'intensité du courant I.

c. Sur le schéma, à l'extérieur de la pile, flécher le sens du courant électrique ainsi que le sens de déplacement des électrons.

d. En déduire les demi-équations se produisant sur chaque électrode, les écrire dans le sens dans lequel elles se produisent effectivement (gain ou perte d'électrons).

e. Écrire l'équation bilan d'oxydoréduction.

f. Comment les masses de chaque électrode vont-elles évoluer ? Justifier la réponse.

g. Retirer le pont salin. Qu'observe-t-on ? À quoi est-ce dû ? Quel est le double rôle du pont salin ?

h. Sur le schéma, faire apparaître le mouvement de tous les porteurs de charge (électron ou ion), à l'intérieur et à l'extérieur de la pile.

CONCLUSION

3 D'autres piles sont-elles possibles ?

a. Réaliser une pile cuivre-plomb et mesurer sa tension à vide.

b. Déterminer les pôles + et – de cette nouvelle pile.

c. La tension à vide dépend-elle des couples oxydant-réducteur choisis pour réaliser les demi-piles ?

d. Réaliser une pile zinc-plomb et mesurer sa tension à vide.

e. Déterminer les pôles + et – de cette nouvelle pile.

f. La polarité (pôle + ou pôle –) d'une demi-pile est-elle toujours la même ? Justifier la réponse.

Je réussis si...

- **Je sais réaliser une pile et la schématiser.**
- **Je sais mesurer la tension à vide et repérer la polarité des électrodes.**
- **Je sais identifier la transformation mise en jeu et interpréter le rôle du pont salin.**

1 Équilibre chimique

Transformations totales et non totales

Soit une **transformation chimique** modélisée par une réaction d'équation :

$$A + B \longrightarrow C + D$$

Si l'un des réactifs A ou B est totalement consommé à l'état final, alors c'est le **réactif limitant.** L'avancement de la réaction est alors maximal, on l'écrit x_{max}, la transformation est dite **totale**.

Mais dans de nombreux cas, à l'état final, il y a présence à la fois des réactifs et des produits. L'avancement final x_f est inférieur à l'avancement maximal x_{max}, la transformation est dite **non totale.**

Le **taux d'avancement final** τ mesure la fraction du réactif limitant qui a réellement réagi :

$$\tau = \frac{x_f}{x_{max}}$$

x_f ← avancement final (en mol)

x_{max} ← avancement maximal (en mol)

RAPPEL

L'avancement x d'une réaction chimique est la quantité (en mol) d'un réactif, dont le nombre stœchiométrique est 1, qui a réagi à un moment donné.

État d'équilibre dynamique

Dans une transformation non totale, la **réaction directe** ❶ (entre les réactifs A et B) est en partie compensée par la **réaction opposée** ❷ (entre les produits C et D).

$$A + B \underset{❷}{\overset{❶}{\rightleftharpoons}} C + D$$

Au niveau microscopique, la vitesse volumique v_1 de disparition de A et B est initialement plus élevée que la vitesse volumique v_2 de disparition de C et D car les concentrations en quantité de matière de A et B sont plus grandes que celles de C et D. Mais au fur et à mesure que A et B disparaissent et que C et D apparaissent, v_1 diminue et v_2 augmente. Les vitesses v_1 et v_2 finissent par devenir égales (FIG. 1).

Quand les réactions opposées se compensent exactement, on dit que le système est dans un **état d'équilibre dynamique.** Les quantités des réactifs et des produits n'évoluent plus, mais les deux réactions opposées continuent de se produire (FIG. 2).

$A + B \xrightarrow[\leftarrow]{v_1 > v_2} C + D$

Avant d'atteindre l'équilibre

$A + B \xrightarrow[\leftarrow]{v_1 = v_2} C + D$

Dans l'état d'équilibre

FIG. 1 Évolution des vitesses volumiques :
- de disparition des réactifs A et B ;
- de disparition des produits C et D.

Quotient de réaction et constante d'équilibre

À chaque réaction chimique d'équation : $a\,A + b\,B \rightleftharpoons c\,D + d\,D$ (a, b, c et d étant les nombres stœchiométriques), on associe un **quotient de réaction** Q_r, défini par :

$$Q_r = \frac{[C]^c \cdot [D]^d}{[A]^a \cdot [B]^b}$$

(sans unité) ←

concentrations en quantité de matière (en $mol \cdot L^{-1}$) ←

Si A, B, C ou D est un solvant, un gaz non dissous ou un solide, sa concentration n'est pas définie, elle est remplacée par le nombre 1 dans l'expression du quotient de réaction Q_r.

EXEMPLES

- $NaCl\,(s) \rightleftarrows Na^+\,(aq) + Cl^-\,(aq)$, on a : $Q_r = [Na^+\,(aq)] \cdot [Cl^-\,(aq)]$.
- $CH_3CO_2H\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftarrows CH_3CO_2^-\,(aq) + H_3O^+\,(aq)$

on a : $Q_r = \dfrac{[CH_3CO_2^-\,(aq)] \cdot [H_3O^+\,(aq)]}{[CH_3CO_2H\,(aq)]}$.



FIG. 2 Ce pont qui relie deux îles illustre bien l'état d'équilibre dynamique. Si les trafics sont identiques dans les deux sens, des véhicules changent d'îles en permanence, mais leur nombre sur chaque île reste constant.

Au cours d'une transformation chimique, les concentrations des réactifs et des produits varient. Le quotient de réaction Q_r évolue donc jusqu'à ce que l'état d'équilibre dynamique soit atteint.

La valeur du quotient de réaction dans l'état d'équilibre dynamique ne dépend pas de la composition initiale du système chimique. On le note $K(T)$ et on l'appelle **constante d'équilibre** :

$$K(T) = \frac{[C]_f^c \cdot [D]_f^d}{[A]_f^a \cdot [B]_f^b}$$

(sans unité) ; concentrations en quantité de matière à l'état final (en mol · L⁻¹)

La constante d'équilibre $K(T)$, associée à l'équation de la réaction, ne dépend que de la température (FIG. 3).

T	10 °C	30 °C	80 °C
$K(T)$	31,2	37,2	51,3

FIG. 3 Valeurs de la constante d'équilibre $K(T)$ en fonction de la température T associée à la transformation :
$KCl(s) \rightleftharpoons K^+(aq) + Cl^-(aq)$

Critère d'évolution d'un système chimique

À l'**état initial**, on mélange A et B, et éventuellement C et D avec des concentrations quelconques. Le quotient de réaction s'écrit alors :

$$Q_{r,i} = \frac{[C]_i^c \cdot [D]_i^d}{[A]_i^a \cdot [B]_i^b}$$

- Si $Q_{r,i} < K(T)$, alors le système chimique évolue dans le sens d'une augmentation de Q_r. Ainsi, [C] et [D] augmentent et [A] et [B] diminuent : la réaction évolue dans le **sens direct**.
- Si $Q_{r,i} > K(T)$, alors le système chimique évolue dans le sens d'une diminution de Q_r. La réaction évolue dans le **sens opposé**.

L'évolution s'arrête lorsque Q_r devient égal à $K(T)$ (FIG. 4).

- Si $Q_{r,i} = K(T)$, alors le système chimique est déjà à l'équilibre.

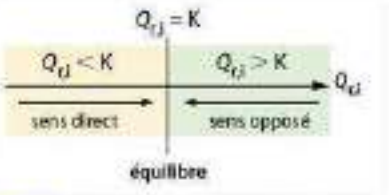


FIG. 4 Évolution d'un système chimique selon la valeur du quotient de réaction initial $Q_{r,i}$.

2 Les piles

Certaines transformations spontanées peuvent être modélisées par des **réactions d'oxydoréduction.**

EXEMPLE

Si l'on met en présence de la poudre de zinc Zn (s) et une solution contenant des ions cuivre Cu^{2+} (aq), une transformation se produit, modélisée par :

$$Cu^{2+}(aq) + Zn(s) \rightarrow Cu(s) + Zn^{2+}(aq)$$

Il s'agit d'une réaction d'oxydoréduction, il y a échange d'électrons entre un oxydant Cu^{2+} et un réducteur Zn :

$$Cu^{2+}(aq) + 2\,e^- = Cu(s) \quad \text{et} \quad Zn(s) = Zn^{2+}(aq) + 2\,e^-$$

Constitution d'une pile

Dans une pile, on sépare les réactifs.

Une pile est constituée de deux **demi-piles**, reliées par un **pont salin** (papier imprégné d'une solution ionique) ou une membrane laissant passer les ions.
Chaque demi-pile est constituée d'un métal M (s) plongeant dans une solution contenant un ion métallique M^{n+} (aq) de sorte que le couple $M^{n+}(aq)/M(s)$ constitue un **couple oxydant-réducteur** (FIG. 5).

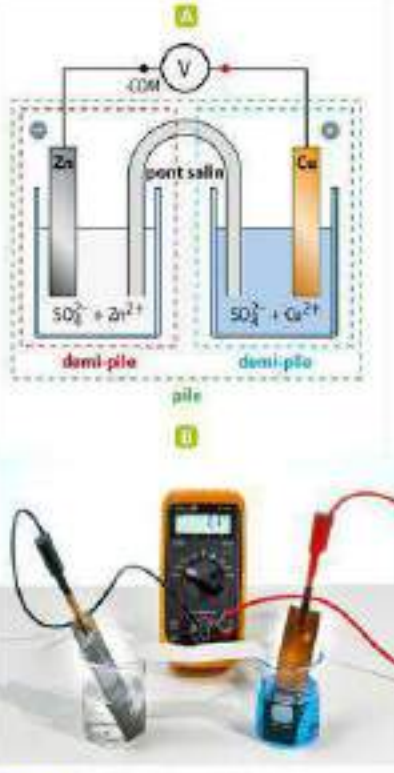


FIG. 5 Une pile cuivre-zinc.
A Schématisation.
B Réalisation au laboratoire.

■ Dans le tableau périodique, les métaux du bloc s (première colonne) perdent facilement l'unique électron de leur couche de valence. Ce sont des réducteurs parfois impliqués dans la constitution des piles.

■ La **tension à vide** de la pile, toujours positive, est la tension entre les deux électrodes lorsqu'aucun courant ne circule. Elle dépend du couple oxydant-réducteur, de la concentration des solutions et de la température (FIG. 6).

Pile	Concentration des ions (en mol · L^{-1})		Tension à vide (en V)
cuivre - zinc	Cu^{2+} (aq)	10^{-1}	1,06 à 0 °C 1,10 à 25 °C
	Zn^{2+} (aq)	10^{-1}	
cuivre - zinc	Cu^{2+} (aq)	10^{-1}	1,16 à 25 °C
	Zn^{2+} (aq)	10^{-3}	
argent - cuivre	Ag^{+} (aq)	10^{-1}	0,46 à 25 °C
	Cu^{2+} (aq)	10^{-1}	

FIG. 6 Différentes valeurs de tension à vide.

Fonctionnement d'une pile

■ Lorsque l'on branche un récepteur aux bornes de la pile (résistance, lampe, moteur...), la pile fonctionne. Une transformation se produit pour laquelle on définit un quotient de réaction Q_r et une constante d'équilibre $K(T)$. Tant que $Q_r < K(T)$, la réaction évolue dans le **sens direct**, Q_r tend vers $K(T)$, des électrons sont échangés spontanément entre les réactifs, un courant électrique circule dans le circuit. Il y a conversion d'énergie chimique en énergie électrique.

Une **pile** est un système chimique **hors équilibre**. Lorsque $Q_r = K(T)$, la réaction est terminée, la pile est usée.

■ La pile peut être usée aussi si le réactif limitant est totalement consommé avant que Q_r n'atteigne $K(T)$.

Mouvement des porteurs de charge électrique

À l'extérieur de la pile, un **courant électrique** circule de la **borne positive vers la borne négative**. Des électrons circulent dans le sens opposé.

■ À la borne négative, le réducteur cède des électrons qui transitent par les fils de connexion. Ces électrons sont récupérés à la borne positive par l'oxydant, qui est alors réduit (FIG. 7).

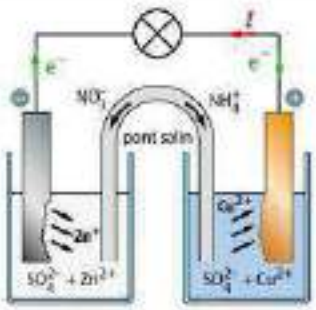


FIG. 7 Mouvement des porteurs de charges dans la pile cuivre-zinc avec un pont salin contenant (NO_3^- (aq), NH_4^+ (aq)).

À l'intérieur de la pile, le **pont salin** permet de fermer le circuit électrique et assure la neutralité des solutions.

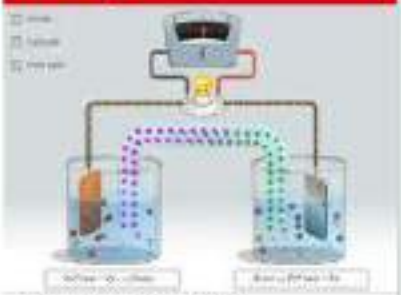
EXEMPLE

Dans la pile de la *figure 7*, le pont salin contient des ions positifs NH_4^+ (aq) et des ions négatifs NO_3^- (aq) qui peuvent se déplacer librement.

Les ions NH_4^+ se déplacent vers la solution de sulfate cuivre pour compenser la perte d'ions positifs Cu^{2+}. Les ions NO_3^- se déplacent vers la solution de sulfate de zinc pour compenser la formation d'ions positifs Zn^{2+}.

BONUS

Mouvement des porteurs de charge



Cette animation décrit le fonctionnement d'une pile.

Capacité électrique d'une pile

La **capacité électrique** q_{max} d'une pile représente la quantité maximale de charges électriques qu'elle peut fournir au cours de son fonctionnement. Elle se mesure en **coulomb** (C).

■ q_{max} dépend de la quantité de matière initiale du réactif limitant.

EXEMPLE

Une pile cuivre-zinc contient 0,20 mol de zinc. On suppose que c'est le réactif limitant. La transformation d'un atome de zinc en un ion Zn^{2+} (aq) libère **2** électrons selon la demi-équation : $Zn\ (s) = Zn^{2+}\ (aq) + 2\ e^-$

Lorsque tous les ions zinc ont réagi, la quantité de matière d'électrons ayant circulé est $n(e^-) = 2 \times 0{,}20 = 0{,}40$ mol. La capacité électrique de la pile est :

$q_{max} = n(e^-) \cdot N_A \cdot e = 0{,}40 \times 6{,}02 \times 10^{23} \times 1{,}6 \times 10^{-19} = 3{,}86 \times 10^4$ C

■ La capacité électrique d'une pile (FIG. 8) est parfois indiquée en milliampère · heure (symbole : mA · h), avec la conversion suivante :

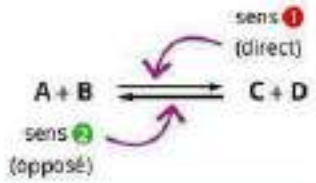
$1\ A \cdot h = 3{,}6 \times 10^3$ C donc $1\ mA \cdot h = 3{,}6$ C.



FIG. 8 Une pile de tension à vide 1,5 V. Plus la capacité électrique est grande, plus la pile peut fournir d'énergie électrique.

1 Transformations non totales

- Certaines réactions chimiques ne sont **pas totales** car elles se produisent dans les deux sens.



- Lorsque la transformation cesse, tous les réactifs et tous les produits sont encore présents. Le système est dans un **état d'équilibre dynamique** : les concentrations des espèces chimiques A, B, C et D n'évoluent plus, mais les réactions 1 et 2 continuent de se produire.

- Le **taux d'avancement final** τ mesure la fraction du réactif limitant qui a réagi lorsque la transformation cesse.

Si $\tau < 1$, la réaction est non totale.

(sans unité)

$$\tau = \frac{x_f}{x_{max}}$$

x_f : avancement final (en **mol**)

x_{max} : avancement maximal (en **mol**)

2 Quotient de réaction et constante d'équilibre

- En solution aqueuse, à chaque réaction chimique d'équation :

$$a\,A + b\,B \rightleftharpoons c\,D + d\,D$$

on associe un **quotient de réaction** Q_r défini par :

(sans unité)

$$Q_r = \frac{[C]^c \cdot [D]^d}{[A]^a \cdot [B]^b}$$

concentrations en quantité de matière (en **mol · L^{-1}**)

- À l'état d'équilibre dynamique, le quotient de réaction Q_r s'appelle **constante d'équilibre K(*T*)**.

(sans unité)

$$K(T) = \frac{[C]_f^c \cdot [D]_f^d}{[A]_f^a \cdot [B]_f^b}$$

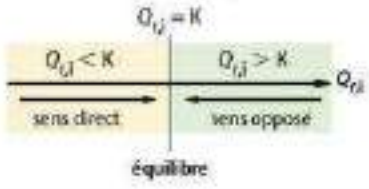
concentrations en quantité de matière à l'état final (en **mol · L^{-1}**)

- K(*T*) ne dépend que de la température et pas de la composition initiale du système.

3 Prévoir le sens d'évolution

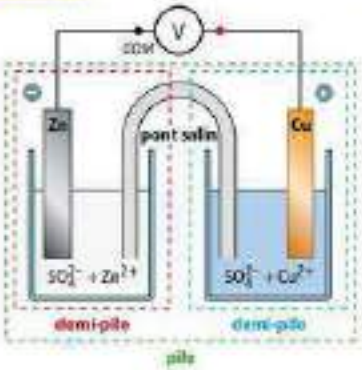
- Au cours d'une transformation chimique, les concentrations des réactifs et des produits évoluent. La valeur de Q_r **évolue jusqu'à atteindre K(*T*)**.

- En comparant les valeurs de $Q_{r,i}$ et de K(*T*), on peut prévoir le sens d'évolution du système.



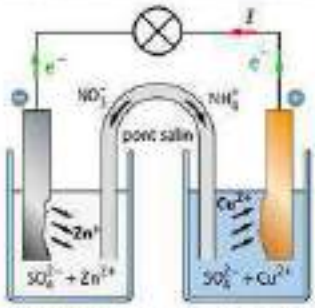
4 Les piles

- Dans une pile, les réactifs d'une réaction d'oxydoréduction sont **séparés dans deux demi-piles**, reliées par un **pont salin**.



- Le pont salin ferme le circuit électrique et assure l'électroneutralité des solutions aqueuses.

- Une pile est un système chimique **hors équilibre**. Lorsque la pile fonctionne, Q_r **tend vers K(*T*)**. Des électrons sont échangés spontanément entre les réactifs, un courant électrique circule dans le circuit.



- Lorsque $Q_r = K(T)$ ou si le réactif limitant est totalement consommé, **la pile est usée**.

- La **capacité électrique** q_{max} d'une pile, en coulomb (C), représente la valeur absolue de la charge électrique de l'ensemble des électrons ayant circulé à l'extérieur de la pile pendant son fonctionnement. On la détermine à partir de la **quantité initiale** du réactif limitant.

Vérifier l'essentiel

EN AUTONOMIE

Pour chaque question, choisir la ou les bonnes réponses. ➡ SOLUTIONS EN PAGE 593

Flash PAGE corrigés détaillés

Flash PAGE QCM interactifs

1 Transformations non totales

	A	B	C
1 Le taux d'avancement final d'une transformation est $\tau = 0{,}20$:	la transformation n'est pas totale.	20 % des réactifs ont réagi.	20 % du réactif limitant ont réagi.
2 Lorsque l'état d'équilibre dynamique est atteint :	il reste 50 % des réactifs et 50 % des produits.	tout s'arrête, il n'y a plus de transformation chimique.	les deux réactions opposées se poursuivent à vitesses égales.

2 Quotient de réaction et constante d'équilibre

	A	B	C
3 Pour la réaction d'équation : $A + 2B \rightleftarrows C + 2D$ Q_r s'écrit :	$Q_r = \frac{[A]\cdot[B]^2}{[C]\cdot[D]^2}$	$Q_r = \frac{[C]\cdot[D]^2}{[A]\cdot[B]^2}$	$Q_r = \frac{[C]\cdot[D]}{[A]\cdot[B]}$
4 La constante d'équilibre K(T) :	dépend de la température.	dépend des concentrations initiales.	évolue au cours de la transformation.

3 Prévoir le sens d'évolution

	A	B	C
5 Un système chimique évolue dans le sens direct si :	$Q_r < K(T)$	$Q_r = 1$	$Q_r > K(T)$
6 Un système est dans l'état d'équilibre dynamique si :	$Q_r = 1$	$Q_r = K(T)$	$K(T) = 1$

4 Les piles

	A	B	C
7 Dans une pile, on sépare les réactifs :	pour que la réaction chimique puisse se produire.	pour forcer les électrons à passer dans des fils.	pour accélérer la réaction chimique.
8 Une pile en fonctionnement :	transforme l'énergie chimique en énergie électrique.	est un système chimique hors équilibre.	transforme l'énergie électrique en lumière.
9 Le pont salin sert à :	augmenter la capacité d'une pile.	assurer la neutralité des solutions.	fermer le circuit électrique.
10 $Zn\,(s) = Zn^{2+}\,(aq) + 2e^-$	est une équation d'oxydoréduction	peut se produire à la borne + d'une pile.	peut se produire dans une demi-pile.
11 La tension à vide :	est égale à la capacité d'une pile.	dépend de la température et des concentrations des solutions.	dépend de la nature des couples oxydant-réducteur.
12 Au cours du fonctionnement d'une pile :	la masse de tous les métaux augmente.	la masse de tous les métaux diminue.	la masse d'un métal augmente et celle de l'autre métal diminue.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Acquérir les bases

1 Transformations non totales

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Savoir décrire l'état d'équilibre dynamique.
- Relier le caractère non total d'une transformation à la présence, à l'état final du système, de tous les réactifs et de tous les produits.
- Savoir déterminer le taux d'avancement final à partir de données sur la composition de l'état final.

Acquérir les bases : 13 17 S'entraîner : 28

13 Transformations totales ou non totales ?

Déterminer si les phrases suivantes correspondent à des réactions totales ou non totales.

a. On utilise une double-flèche dans l'écriture de l'équation chimique.

b. Un des réactifs a totalement disparu à la fin.

c. À l'état final, il y a coexistence des réactifs et des produits.

d. Le taux d'avancement final est $\tau = 72\ \%$.

e. Les réactifs réagissent entre eux, mais les produits ne réagissent pas entre eux.

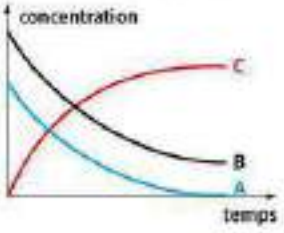
14 Étude graphique

On considère une transformation dont l'équation de réaction est :

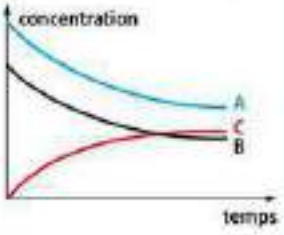
$$A + B \rightarrow C$$

On donne les représentations graphiques de l'évolution des concentrations en quantité de matière des réactifs et des produits, au cours de deux transformations différentes. Sont-elles totales ou non totales ? Justifier la réponse.

Transformation 1



Transformation 2



15 Différents états finaux possibles

Soit une transformation chimique dont l'équation de réaction est :

$$A + B \rightleftarrows C + D$$

On donne ci-dessous trois compositions possibles (en mol) du système à l'état final :

État final	n_A	n_B	n_C	n_D
1	0,30	0	0,70	0,90
2	2,2	1,7	0,13	0,19
3	0,12	0,12	0	0

Quel état final correspond à une transformation non totale ? Justifier la réponse.

16 Tableau d'avancement

Voici le tableau d'avancement d'une réaction :

Réaction	A	+ 2 B	⇄ 3 C	+ D
État du système	Quantité de matière (en mol)			
initial	4		5	0
intermédiaire		8		2
final	1			
maximal		4		

1. Recopier le tableau et compléter les cases vides.

2. D'après ce tableau, quelles sont les valeurs de l'avancement final x_f et l'avancement maximal x_{max} de cette réaction ?

3. En déduire le taux d'avancement final.

4. Tous les réactifs et tous les produits sont-ils présents à l'état final ?

5. Cette transformation est-elle totale ? Justifier la réponse.

17 L'acide propanoïque

On verse 0,15 mol d'acide propanoïque $C_2H_5CO_2H$ dans une très grande quantité d'eau, il se produit une transformation dont l'équation de réaction est :

$$C_2H_5CO_2H\ (\ell) + H_2O\ (\ell) \rightleftarrows C_2H_5CO_2^-\ (aq) + H_3O^+\ (aq)$$

Lorsque l'on atteint l'état d'équilibre, on mesure la quantité d'ions oxonium présents dans la solution.

On trouve : $n(H_3O^+)_f = 1{,}26 \times 10^{-3}$ mol.

1. Établir le tableau d'avancement de cette réaction.

2. Calculer les valeurs de l'avancement final x_f et l'avancement maximal x_{max} de cette réaction.

3. En déduire le taux d'avancement final.

4. Tous les réactifs et tous les produits sont-ils présents à l'état final ?

5. Cette transformation est-elle totale ? Justifier la réponse.

18 Dissolution du sel de cuisine

Le chlorure de sodium, ou sel de cuisine, se dissout dans l'eau selon la réaction d'équation :

$$NaCl\ (s) \rightleftarrows Na^+\ (aq) + Cl^-\ (aq)$$

Dans une première casserole, on verse 50 g de sel et on ajoute de l'eau jusqu'à la graduation 1,0 L tout en remuant. La totalité du sel est dissout.

Dans une seconde casserole, on verse 400 g de sel et on ajoute de l'eau jusqu'à la graduation 1,0 L tout en remuant. À la fin, il reste 64 g de sel non dissout.

1. Établir les tableaux d'avancement des deux systèmes chimiques décrits ci-dessus.

2. Dans les deux cas, calculer les valeurs de l'avancement final x_f et l'avancement maximal x_{max}. En déduire la valeur du taux d'avancement final.

3. Dans ces deux systèmes, les transformations sont-elles totales ?

***Données :** masses molaires atomiques*
$M_{Na} = 23{,}0\ g \cdot mol^{-1}$; $M_{Cl} = 35{,}5\ g \cdot mol^{-1}$.

2 Quotient de réaction et constante d'équilibre

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Savoir écrire le quotient de réaction Q_r et la constante d'équilibre $K(T)$.
- Savoir déterminer si un système est à l'équilibre.

Acquérir les bases : 19 21 S'entraîner : 23

19 Quotients de réactions

Pour chacun des équilibres chimiques ci-dessous, donner l'expression du quotient de réaction.

a. $Ag^+ (aq) + Cl^- (aq) \rightleftarrows AgCl (s)$

b. $HCO_2H (aq) + H_2O (\ell) \rightleftarrows HCO_2^- (aq) + H_3O^+ (aq)$

c. $BaSO_4 (s) \rightleftarrows Ba^{2+} (aq) + SO_4^{2-} (aq)$

d. $3\,Zn^{2+} (aq) + 2\,Al (s) \rightleftarrows 3\,Zn (s) + 2\,Al^{3+} (aq)$

e. $H_2SO_4 (s) + 2\,H_2O (\ell) \rightleftarrows SO_4^{2-} (aq) + 2\,H_3O^+ (aq)$

f. $2\,Fe^{3+} (aq) + 2\,S_2O_3^{2-} (aq) \rightleftarrows 2\,Fe^{2+} (aq) + S_4O_6^{2-} (aq)$

20 Calcul d'une constante d'équilibre

L'acide benzoïque $C_6H_5CO_2H (aq)$ réagit sur l'eau $H_2O (\ell)$ selon la réaction d'équation :

$$C_6H_5CO_2H (aq) + H_2O (\ell) \rightleftarrows C_6H_5CO_2^- (aq) + H_3O^+ (aq)$$

On donne la composition du système, à l'état initial et à l'état final pour un volume $V = 2,0$ L.

État initial	État final
$n(C_6H_5CO_2H)_i = 0,30$ mol	$n(C_6H_5CO_2H)_f = 0,294$ mol
$n(H_2O)_i$ en excès (solvant)	$n(H_2O)_f$: en excès (solvant)
$n(C_6H_5CO_2^-)_i = 0$ mol	$n(C_6H_5CO_2^-)_f = 0,0061$ mol
$n(H_3O^+)_i = 0$ mol	$n(H_3O^+)_f = 0,0061$ mol

1. Donner l'expression du quotient de réaction $Q_{r,i}$ à l'état initial, et calculer sa valeur.
2. Donner l'expression de la constante d'équilibre $K(T)$ et calculer sa valeur.

21 Système à l'équilibre

On considère la réaction d'équation suivante dont la constante d'équilibre est $K(T) = 0,630$:

$$HSO_3^- (aq) + HS^- (aq) \rightleftarrows SO_3^{2-} (aq) + H_2S (aq)$$

Dans le tableau ci-dessous, on donne les concentrations en quantité de matière de réactifs et de produits pour trois systèmes chimiques.

	$[HSO_3^-]$ (en mol · L^{-1})	$[HS^-]$ (en mol · L^{-1})	$[SO_3^{2-}]$ (en mol · L^{-1})	$[H_2S]$ (en mol · L^{-1})
1	0,300	0,300	0,300	0,300
2	0,379	0,223	0,177	0,301
3	0,326	0,245	0,120	0,120

1. Pour chaque système, calculer la valeur du quotient de réaction Q_r.
2. Certains systèmes sont-ils à l'équilibre ?

3 Prévoir le sens d'évolution

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Prévoir le sens d'évolution d'une réaction en comparant Q_r et $K(T)$.

Acquérir les bases : 22 S'entraîner : 25

22 Prévoir le sens d'évolution

Les ions fer $Fe^{3+} (aq)$ réagissent avec les ions iodure $I^- (aq)$ selon la réaction d'équation ci-dessous et dont la constante d'équilibre est $K(T) = 5,0 \times 10^4$:

$$2\,Fe^{3+} (aq) + 2\,I^- (aq) \rightleftarrows 2\,Fe^{2+} (aq) + I_2 (aq)$$

Dans ce tableau, on donne les concentrations en quantité de matière de réactifs et de produits pour trois systèmes chimiques.

	$[Fe^{3+}]$ (en mol · L^{-1})	$[I^-]$ (en mol · L^{-1})	$[Fe^{2+}]$ (en mol · L^{-1})	$[I_2]$ (en mol · L^{-1})
1	$4,1 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-1}$	$3,0 \times 10^{-3}$
2	$9,2 \times 10^{-3}$	$4,3 \times 10^{-3}$	$6,1 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-2}$
3	0,040	0,025	0,18	0,11

1. Donner l'expression de la constante d'équilibre $K(T)$.
2. Prévoir le sens d'évolution spontanée de chaque système.

23 Un beau mélange



Les ions cuivre $Cu^{2+} (aq)$ colorent en bleu les solutions qui les contiennent.

Dans un bécher, on introduit 0,010 mol d'ions $Cu^{2+} (aq)$, 0,015 mol d'ions $Fe^{2+} (aq)$, 0,030 mol d'ions $Fe^{3+} (aq)$ et quelques copeaux de cuivre solide Cu (s).

Le volume de la solution obtenue est $V = 200$ mL.

Après quelques minutes, on observe que la coloration bleue de la solution devient plus intense.

Voici l'équation de la réaction chimique :

$$Fe^{3+} (aq) + Cu (s) \rightleftarrows Fe^{2+} (aq) + Cu^{2+} (aq)$$

La constante d'équilibre associée à cette réaction est :

$$K(T) = 3,8 \times 10^{40}.$$

1. Donner l'expression du quotient de réaction initial $Q_{r,i}$ et calculer sa valeur.
2. La valeur calculée de $Q_{r,i}$ est-elle cohérente avec l'observation expérimentale ?

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

4 Les piles

EN AUTONOMIE

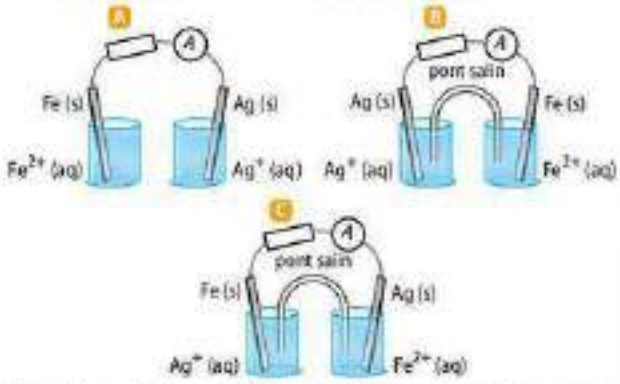
Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Savoir justifier la stratégie de séparation des réactifs et l'utilisation d'un pont salin.
- Savoir modéliser et schématiser le fonctionnement d'une pile.
- Savoir déterminer la capacité d'une pile.

→ Acquérir les bases : 24 25 → S'entraîner : 30

24 Schéma d'une pile

On veut réaliser une pile fer-argent constituée de deux demi-piles contenant chacune un couple oxydant-réducteur : Fe^{2+} (aq) / Fe (s) pour l'une et Ag^+ (aq) / Ag (s) pour l'autre.



Parmi les schémas ci-dessus, indiquer celui qui est correct et expliquer pourquoi les autres ne le sont pas.

25 Réaction spontanée

Lorsque l'on plonge une lame de plomb Pb (s) dans une solution aqueuse contenant des ions argent Ag^+ (aq), il se forme un dépôt d'argent Ag (s) sur la partie immergée de la lame.

Lorsque l'on plonge un fil d'argent Ag (s) dans une solution contenant des ions plomb Pb^{2+} (aq), rien ne se produit.

1. Déduire des observations précédentes l'équation de la réaction spontanée qui peut se produire entre les couples Ag^+ (aq) / Ag (s) et Pb^{2+} (aq) / Pb (s).

2. Schématiser la pile constituée de ces deux couples oxydant-réducteur sachant qu'à ses bornes sont branchés un conducteur ohmique et un ampèremètre en série.

3. Déduire de la réponse à la question 1 les demi-équations se produisant aux électrodes.

4. Représenter sur le schéma précédent le sens de circulation des électrons à l'extérieur de la pile, le sens du courant, la borne + et la borne −.

26 Usure d'une pile

On réalise une pile cadmium-argent contenant les couples Ag^+ (aq) / Ag (s) et Cd^{2+} (aq) / Cd (s).

On utilise des solutions de concentrations en quantité de matière initiales d'ions métalliques égales à 0,15 mol · L^{-1} et de volume V = 250 mL. Les parties immergées des électrodes ont une masse de 30 g.

Lorsque la pile fonctionne, la masse de l'électrode de cadmium Cd (s) diminue et il se forme un dépôt d'argent Ag (s) sur l'électrode d'argent.

Données :

- $M_{Cd} = 112,4\ g \cdot mol^{-1}$; $M_{Ag} = 108,0\ g \cdot mol^{-1}$;
- $e = 1,6 \times 10^{-19}\ C$; $N_A = 6,02 \times 10^{23}\ mol^{-1}$.

1. Écrire les demi-équations aux électrodes et en déduire l'équation de la réaction d'oxydoréduction qui se produit dans la pile en fonctionnement.

2. Construire le tableau d'avancement de la réaction et en déduire la nature du réactif limitant.

3. Calculer la capacité de la pile, en coulomb.

27 Pile et sueur



Des chercheurs du CNRS ont breveté cette biopile à combustible, étirable et flexible, collée ici à l'arrière du bras. Elle utilise le dioxygène O_2 (g) de l'air et l'acide lactique $C_3H_6O_3$ (aq) contenu dans la transpiration pour produire de l'électricité et alimenter une DEL (diode électroluminescente) fixée ici sur l'avant-bras. Peut-être un jour, serait-on capable de l'améliorer pour alimenter des dispositifs portables plus importants, comme un smartphone par exemple ?

Données : *couples oxydant-réducteur :*
O_2 (g) / H_2O (ℓ) ; $C_3H_4O_3$ (aq) / $C_3H_6O_3$ (aq).

Écrire les demi-équations aux électrodes et en déduire l'équation de la réaction d'oxydoréduction qui se produit dans la pile en fonctionnement.

Faire le point avant d'aller plus loin

PRÉPA BAC

Pour vérifier ses connaissances, répondre aux questions suivantes (sans regarder le cours !)

- Énoncer le critère d'évolution spontanée d'un système.
- Définir le taux d'avancement final d'une réaction.
- Définir la constante d'équilibre K(T) d'un système chimique.
- Définir la capacité d'une pile.
- Écrire l'expression du quotient de réaction Q_r à l'équilibre associé à cette réaction chimique : A (aq) + 2 B (aq) ⇄ C (s) + D (aq)
- Expliquer le modèle de l'équilibre dynamique d'un système chimique.
- Schématiser une pile.
- Expliquer le fonctionnement d'une pile.

Retrouver ces questions en version numérique Flash PAGE cartes mémos

Exercice résolu EN AUTONOMIE

28 Suivi d'une réaction

Au laboratoire, par chauffage à reflux dans un ballon, on réalise la synthèse de l'éthanoate de benzyle $C_9H_{10}O_2$ (ℓ) que l'on notera **E**, par réaction entre 0,10 mol d'acide éthanoïque $C_2H_4O_2$ (ℓ) et 0,10 mol d'alcool benzylique C_7H_8O (ℓ) selon la réaction de constante d'équilibre $K(T) = 4,0$ à 25 °C et d'équation :

$$\underset{\text{acide}}{C_2H_4O_2\,(\ell)} + \underset{\text{alcool}}{C_7H_8O\,(\ell)} \rightleftarrows \underset{\text{éthanoate de benzyle (E)}}{C_9H_{10}O_2\,(\ell)} + \underset{\text{eau}}{H_2O\,(\ell)}$$

Pendant la synthèse, le volume de liquide à l'intérieur du ballon reste identique. À l'instant t_1 = 10 min après le début du chauffage, on réalise un titrage de l'acide restant, on obtient : $n_{acide} = 0,070$ mol.

1. Établir le tableau d'avancement de la réaction et calculer les quantités de matière de toutes les espèces chimiques présentes à l'instants t_1.
2. Exprimer le quotient de réaction Q_r et calculer sa valeur à cet instant t_1.
3. L'état d'équilibre dynamique est-il atteint ?
4. À l'instant t_2 = 1 h, on a atteint l'état d'équilibre dynamique (état final). On mesure la quantité d'acide restant : $n_{acide} = 0,033$ mol. Calculer le taux d'avancement final τ. La transformation est-elle totale ?



L'arôme de jasmin contient l'éthanoate de benzyle.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- Les **quantités initiales** des réactifs et la **constante d'équilibre** sont données.
- Cette donnée concerne l'état final de la transformation.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1.

Équation	$C_2H_4O_2$ (ℓ) +	C_7H_8O (ℓ) ⇄	$C_9H_{10}O_2$ (ℓ) +	H_2O (ℓ)
État du système	n_{acide}	n_{alcool}	n_E	n_{eau}
initial	0,10	0,10	0	0
intermédiaire	$0,10 - x$	$0,10 - x$	x	x
final	$0,10 - x_f$	$0,10 - x_f$	x_f	x_f
maximal	$0,10 - x_{max}$	$0,10 - x_{max}$	x_{max}	x_{max}

À t_1 = 10 min (état intermédiaire), on a : $n_{acide} = n_{alcool} = 0,10 - x(t_1) = 0,070$ mol, donc $x(t_1) = 0,030$ mol et $n_E = n_{eau} = x(t_1) = 0,030$ mol.

2. $Q_r = \dfrac{[E]\cdot[eau]}{[acide]\cdot[alcool]} = \dfrac{\frac{n_E}{V}\cdot\frac{n_{eau}}{V}}{\frac{n_{acide}}{V}\times\frac{n_{alcool}}{V}}$, après simplification par V, on a :

$$Q_r = \frac{n_E \cdot n_{eau}}{n_{acide} \cdot n_{alcool}} = \frac{0,030 \times 0,030}{0,070 \times 0,070} \text{ soit } \mathbf{Q_r = 0,18}.$$

3. $Q_r < K(T)$, donc le système évolue dans le sens direct.

4. À t_2 = 1 h, on a : $n_{acide} = 0,10 - x_f = 0,033$ mol donc $x_f = 0,067$ mol.

À l'état maximal, $0,10 - x_{max} = 0$, donc $x_{max} = 0,10$ mol.

On calcule $\tau = \dfrac{x_f}{x_{max}} = \dfrac{0,067}{0,10}$ soit $\tau = 0,67 = 67\,\%$ (transformation non totale).

QUELQUES CONSEILS

2. Attention, ici l'eau n'est pas le solvant car les réactifs sont utilisés purs et non pas en solution aqueuse. L'eau est donc un produit de la réaction.
3. Comparer Q_r et $K(T)$ et utiliser le critère d'évolution spontanée.
4. Exploiter le tableau d'avancement pour calculer les valeurs de x_f et x_{max}.

EXERCICE SIMILAIRE

29 L'arome de lavande

On réalise la synthèse d'une molécule à l'odeur de lavande : l'acétate de linalyle $C_{12}H_{20}O_2$ (ℓ) que l'on notera **A**.

La synthèse est réalisée à partir d'un mélange équimolaire de 1,00 mol d'acide éthanoïque $C_2H_4O_2$ (ℓ) et de linalol $C_{10}H_{18}O$ (ℓ) selon la réaction de constante d'équilibre $K(T) = 1,23 \times 10^{-2}$ à 25 °C et d'équation :

$$\underset{\text{acide}}{C_2H_4O_2\,(\ell)} + \underset{\text{linalol}}{C_{10}H_{18}O\,(\ell)} \rightleftarrows \underset{\text{A}}{C_{12}H_{20}O_2\,(\ell)} + \underset{\text{eau}}{H_2O\,(\ell)}$$

Pendant la synthèse, le volume reste constant.

À l'instant t_1 = 30 min, on mesure la quantité d'acétate de linalyle présente dans le ballon : $n_A = 2,35 \times 10^{-4}$ mol.

À l'instant t_2 = 2 jours, on atteint l'état d'équilibre dynamique, la quantité d'acétate de linalyle présente dans le ballon est $n_A = 9,87 \times 10^{-3}$ mol.

- Reprendre les questions 1 à 4 de l'exercice **28**.

Exercice résolu EN AUTONOMIE

30 Réalisation d'une pile d'étude

On branche en série un ampèremètre, un conducteur ohmique et une pile argent-nickel contenant les couples oxydant-réducteur Ag^+ (aq) / Ag (s) et Ni^{2+} (aq) / Ni (s). La borne COM de l'ampèremètre est branchée sur l'électrode de nickel. Lorsque la pile fonctionne, on constate que la masse de l'électrode d'argent augmente alors que celle de l'électrode de nickel diminue.



Données :
- *Masse molaire atomique : $M_{Ni} = 58,7\ g \cdot mol^{-1}$.*
- *Charge élémentaire $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C.*
- *Constante d'Avogadro $N_A = 6,02 \times 10^{23}\ mol^{-1}$.*

1. Faire un schéma de la pile reliée au circuit extérieur.

2. À partir des observations citées dans l'énoncé :
a. écrire les demi-équations se produisant aux électrodes ;
b. écrire l'équation de la réaction d'oxydoréduction qui en résulte ;
c. indiquer le sens de déplacement des électrons à l'extérieur de la pile ;
d. indiquer le sens du courant ainsi que les bornes + et – des électrodes.

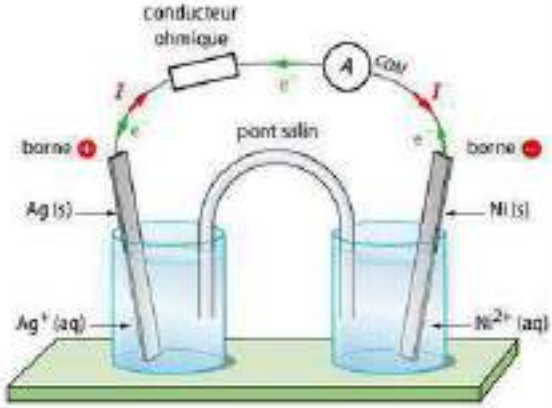
3. Le réactif limitant le fonctionnement de cette pile est la lame de nickel dont la partie immergée a une masse $m = 10,0$ g. Calculer la capacité q_{max} de cette pile.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- Chaque demi-pile est constituée par un **couple oxydant-réducteur**.
- Ces **observations expérimentales** permettent d'interpréter le fonctionnement de la pile.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. Schéma de la pile :



2. a. *Observation* 1 : la masse de l'électrode d'argent augmente, donc la demi-équation 1 est :

$$Ag^+ (aq) + e^- = Ag (s)$$

Observation 2 : la masse de l'électrode de nickel diminue, donc la demi-équation 2 est :

$$Ni (s) = Ni^{2+} (aq) + 2\,e^-$$

b. Pour égaliser le nombre d'électrons échangés, on multiplie par 2 la demi-équation 1. On obtient l'équation de la réaction d'oxydoréduction :

$$2\,Ag^+ (aq) + Ni (s) \rightleftarrows 2\,Ag (s) + Ni^{2+} (aq)$$

c. D'après les demi-équations, des électrons sont produits du côté de l'électrode de nickel et consommés du côté de l'électrode d'argent.
À l'extérieur de la pile, les électrons se déplacent donc de l'électrode de nickel vers l'électrode d'argent.
d. Le courant I circule dans le sens opposé, de l'argent (donc borne +) vers le nickel (donc borne –).

3. Au cours du fonctionnement de la pile, la quantité de nickel consommée est :

$$n_{Ni} = \frac{m_{Ni}}{M_{Ni}} = \frac{10,0}{58,7} \text{ soit } n_{Ni} = 0,170 \text{ mol.}$$

Chaque atome de nickel libère **2** électrons, la capacité de la pile est donc :
$q_{max} = 2 \times n_{Ni} \times N_A \times e = 2 \times 0,170 \times 6,02 \times 10^{23} \times 1,6 \times 10^{-19}$; $q_{max} = 3,3 \times 10^4$ **C.**

QUELQUES CONSEILS

1. Faire un grand schéma et ne pas oublier de dessiner le pont salin.
2. À partir des observations, déduire le sens dans lequel les demi-équations se produisent aux électrodes.
Se rappeler que le nombre d'électrons gagnés ou perdus doit être le même sur chaque électrode.

EXERCICE SIMILAIRE

31 Fonctionnement d'une pile

On branche en série un ampèremètre, un conducteur ohmique et une pile aluminium-nickel contenant les couples oxydant-réducteur Al^{3+} (aq) / Al (s) et Ni^{2+} (aq) / Ni (s). La borne COM de l'ampèremètre est branchée sur l'électrode d'aluminium. Lorsque la pile fonctionne, on constate que la masse de l'électrode de nickel augmente alors que celle de l'électrode d'aluminium diminue.

Données :
- *Masse molaire atomique : $M_{Al} = 27,0\ g \cdot mol^{-1}$.*
- *Charge élémentaire $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C.*
- *Constante d'Avogadro $N_A = 6,02 \times 10^{23}\ mol^{-1}$.*

■ Reprendre les questions 1 à 3 de l'exercice **30**, sachant que l'aluminium est le réactif limitant avec $m = 15,0$ g.

S'entraîner pour maîtriser

SAVOIR RÉDIGER

32 Proposer une correction de la solution donnée par un élève à l'énoncé.

Énoncé

Le sel de cuisine, ou chlorure de sodium à l'état solide (s), se dissout facilement dans l'eau en formant des ions selon la réaction de dissolution d'équation :

$$NaCl(s) \rightleftarrows Na^+(aq) + Cl^-(aq)$$

Mais il a une solubilité maximale. Si on en met trop, il ne se dissout plus et reste solide au fond de l'eau. On pourrait alors penser que plus rien ne se passe puisque, même en remuant fortement, le sel ne se dissout plus.

En réalité, on a atteint un état d'équilibre dynamique : du solide continue de se dissoudre et des ions reforment du solide, mais ces deux processus opposés se produisent à la même vitesse.

Donnée : *la constante d'équilibre à 25 °C de la réaction étudiée est* $K(T) = 32,98$.

Pour étudier cet équilibre, des élèves récupèrent de l'eau de mer que l'on assimilera à une solution aqueuse contenant uniquement des ions $Na^+(aq)$ et $Cl^-(aq)$, à la même concentration 0,50 mol · L^{-1}.

Dans un bécher, ils versent 15 g de sel (c'est-à-dire 0,26 mol) et complètent avec de l'eau de mer pour obtenir un volume $V = 100$ mL.

1. Pourquoi l'état d'équilibre est-il qualifié de dynamique ?
2. Donner l'expression du quotient de réaction du système et calculer sa valeur.
3. Le système constitué par les élèves est-il à l'équilibre ? Comment va évoluer la quantité de sel solide ?

Solution proposée par un élève

1. L'état d'équilibre est qualifié de dynamique car on remue fortement la solution.) Revoir la définition d'un équilibre dynamique

2. $Q_r = \dfrac{[Na^+] \cdot [Cl^-]}{[NaCl]} = \dfrac{0,50^2}{\left(\frac{0,26}{0,100}\right)} = 0,096$) Attention : NaCl est un solide

3. Dans notre système, on a : $0,096 < 32,98$ donc $Q_r < K(T)$, le système n'est pas à l'équilibre.
D'après le critère d'évolution spontanée, il va évoluer dans le sens opposé, c'est-à-dire dans le sens de la formation du solide NaCl (s).) Le critère d'évolution spontanée est mal utilisé

33 Two different balances*





1. Match the photos above with the corresponding expressions *dynamic balance* or *static balance* ?
2. What is the main difference between these two types of balances ?

* *balance* veut dire équilibre.

34 Synthèse d'un arôme de poire

L'éthanoate de propyle $C_5H_{10}O_2$ est un ester à l'odeur de poire. Il peut être synthétisé selon deux transformations chimiques différentes :

A $C_2H_4O_2$ (acide éthanoïque) + C_3H_8O (propanol) $\rightleftarrows$ $C_5H_{10}O_2$ (éthanoate de propyle) + H_2O (eau)

B $C_4H_6O_3$ (anhydride éthanoïque) + C_3H_8O (propanol) $\rightleftarrows$ $C_5H_{10}O_2$ (éthanoate de propyle) + $C_2H_4O_2$ (acide éthanoïque)

La réaction est réalisée en utilisant pour : A 15,0 g d'acide éthanoïque et 12,0 g de propanol, on obtient 11,6 g d'éthanoate de propyle ; B 30,6 g d'anhydride éthanoïque et 9,0 g de propanol, on obtient 15,3 g d'éthanoate de propyle.

Pour chaque réaction, répondre aux questions 1 à 3.

Données : $M_C = 12,0$ g · mol^{-1} ; $M_H = 1,0$ g · mol^{-1} ; $M_O = 16,0$ g · mol^{-1}.

JE VÉRIFIE QUE J'AI...

- tenu compte des quantités de réactif différentes dans A et B.

1. Établir le tableau d'avancement de la réaction.
2. Calculer les valeurs de l'avancement final x_f et l'avancement maximal x_{max} de la réaction et en déduire la valeur du taux d'avancement final τ.
3. Le symbole de la double flèche $\rightleftarrows$ est-il correct ?

35 Conductivité du vinaigre

TABLEUR-GRAPHEUR

On peut considérer que le vinaigre blanc du commerce est une solution aqueuse d'acide éthanoïque CH_3CO_2H de concentration en quantité de matière $c = 1,3$ mol · L^{-1}.

Au cours d'un TP, 16 élèves mesurent la conductivité σ_{exp} (en S · m^{-1}) de ce vinaigre dilué 10 fois. Voici les résultats :

Nombre d'élèves	1	2	6	4	3
σ_{exp}	0,156	0,172	0,179	0,186	0,198

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Données :

• *Loi de Kohlrausch :* $\sigma_{solution} = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \cdot [X_i]$

avec $[X_i]$ *en mol · m*$^{-3}$ *et* λ_i *en S · m*^{2} *· mol*$^{-1}$.

• $\lambda_{CH_3CO_2^-} = 4{,}1 \times 10^{-3}$ S · m^2 · mol^{-1} ;

$\lambda_{H_3O^+} = 3{,}5 \times 10^{-2}$ S · m^2 · mol^{-1}.

1. a. À l'aide d'un tableur-grapheur, représenter l'histogramme de la variabilité des mesures (FICHE MÉTHODE ➡ p. 538).

b. Dans le tableur, afficher la valeur moyenne $\overline{\sigma_{exp}}$ avec trois chiffres significatifs.

c. Afficher ensuite l'écart-type s_σ et l'incertitude-type $u(\sigma_{exp})$ avec un seul chiffre significatif.

d. Comment expliquer cette dispersion des résultats ? Semble-t-elle satisfaisante ?

Pour la suite, on admettra que la meilleure valeur de la conductivité à retenir est $\overline{\sigma_{exp}}$.

2. Écrire l'équation de la réaction acide-base entre l'acide éthanoïque et l'eau.

3. Établir le tableau d'avancement de la réaction pour un litre de vinaigre dilué 10 fois.

4. À l'aide de la loi de Kohlrausch, calculer la conductivité théorique σ_{th} d'une solution d'acide éthanoïque à 0,13 mol · L^{-1} en supposant que la transformation chimique est totale. On considère que les seuls ions présents en solution sont $CH_3CO_2^-$ (aq) et H_3O^+ (aq).

5. La supposition précédente est-elle correcte ?

6. Que peut-on dire du taux d'avancement final de la réaction de l'acide avec l'eau ?

7. Calculer les valeurs de l'avancement final x_f et l'avancement maximal x_{max}. En déduire la valeur du taux d'avancement final. La réponse à la question 5 est-elle confirmée ?

36 Dosage et critère d'évolution spontanée

On cherche à vérifier le critère d'évolution spontanée dans le cas de la réaction d'équation :

$$2\,Fe^{3+}\,(aq) + Cu\,(s) \rightleftarrows 2\,Fe^{2+}\,(aq) + Cu^{2+}\,(aq)$$

La constante d'équilibre de la réaction est : $K(T) = 3{,}8 \times 10^{40}$. On dispose de trois solutions S :

Solution	Composition et concentrations (en mol · L^{-1})
S_1 : sulfate de cuivre	$[Cu^{2+}\,(aq)] = 0{,}010$ $[SO_4^{2-}\,(aq)] = 0{,}010$
S_2 : sulfate de fer (II)	$[Fe^{2+}\,(aq)] = 0{,}015$ $[SO_4^{2-}\,(aq)] = 0{,}015$
S_3 : sulfate de fer (III)	$[Fe^{3+}\,(aq)] = 0{,}020$ $[SO_4^{2-}\,(aq)] = 0{,}030$

Dans un bécher, on verse 25 mL de chacune des solutions et on ajoute une pointe de poudre de cuivre Cu(s) de sorte que le volume total soit égal à 75 mL (on néglige le volume du cuivre solide).

1. Quels sont les couples oxydant-réducteur qui interviennent dans l'équation de la réaction ?

2. Les ions SO_4^{2-} (aq) sont présents mais n'interviennent pas dans la réaction. Comment appelle-t-on ce type d'espèce chimique ?

3. Calculer, dans le mélange initial de volume 75 mL, les concentrations en quantité de matière de toutes les espèces ioniques de l'équation.

4. Exprimer le quotient de réaction initial $Q_{r,i}$ et calculer sa valeur.

5. Lorsque l'équilibre est atteint, un dosage permet de déterminer la concentration finale des ions Fe^{2+} dans la solution. On obtient $[Fe^{2+}] = 1{,}17 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.

Cette valeur est-elle en accord avec le critère d'évolution spontanée ? Justifier la réponse.

JE VÉRIFIE QUE J'AI...

- tenu compte de la dilution des solutions initiales ;
- utilisé correctement le critère d'évolution spontanée.

37 La pile de Volta

HISTOIRE DES SCIENCES

Alessandro Volta est connu pour être l'inventeur de la première pile électrique. Il la décrivait dans une lettre adressée à la Royal Society en 1800, en voici un résumé :



Alessandro Volta (1745-1827) et sa pile.

Je me fournis de quelques douzaines de petites plaques rondes de cuivre, ou mieux d'argent, et d'un nombre égal de plaques d'étain, ou mieux, de zinc, de la même grandeur. Je prépare, en outre, des rondelles de carton, de peau, ou de quelque autre matière spongieuse, capable d'imbiber et de retenir beaucoup d'eau, ou, ce qui est beaucoup mieux, d'eau salée.

Je pose horizontalement un des plateaux métalliques, par exemple un d'argent, et sur ce premier, j'en adapte un de zinc ; sur le second, je couche un des disques mouillés, puis un autre plateau d'argent, suivi d'un autre de zinc auquel je fais succéder encore un disque mouillé. Je continue ainsi de la même façon et toujours dans le même sens.

Si la colonne parvient à contenir environ vingt de ces étages, elle sera déjà capable de charger un condensateur au point de lui faire donner une étincelle.

1. Quel rôle les « disques mouillés » jouent-ils dans la pile de Volta ?

2. Justifier le texte souligné.

3. Quel fait expérimental cité dans le texte montre que le dispositif cède de l'énergie électrique ?

4. On donne les tensions à vide U de différentes piles.

étain-cuivre	zinc-cuivre	étain-argent	zinc-argent
0,48 V	1,1 V	0,94 V	1,6 V

Utiliser ces données pour justifier les deux premières phrases du texte.

5. Lorsque des piles sont associées en série, leurs tensions à vide s'ajoutent.

Si on réalisait la même association que Volta avec des piles zinc-argent, quelle serait la valeur de la tension à vide du générateur ainsi constitué ?

38 Capacité d'une pile zinc-argent

On réalise une pile zinc-argent contenant les couples oxydant-réducteur Ag^+ (aq) / Ag (s) et Zn^{2+} (aq) / Zn (s).

Les demi-piles contiennent 100 mL de solutions ioniques de concentrations en quantité de matière d'ions métalliques identiques et égales à 0,20 mol · L^{-1}.

La partie immergée des électrodes métalliques, dans l'état initial, a pour masse $m = 2,0$ g.

Le pont salin est constitué d'une bande de papier imbibé d'une solution de nitrate de potassium (K^+ (aq), NO_3^- (aq)).

Lors du fonctionnement de la pile, l'ampèremètre indique que le courant électrique circule de l'électrode d'argent vers celle de zinc.

Donnée : $M_{Zn} = 65,4$ g · mol^{-1}.

1. Schématiser la pile zinc-argent.
2. Écrire les demi-équations se produisant aux électrodes et en déduire l'équation de la réaction d'oxydoréduction de fonctionnement de la pile.
3. La réaction précédente a pour constante d'équilibre $K(T) = 1,0 \times 10^{52}$. Le critère d'évolution spontanée est-il cohérent avec l'observation expérimentale ?
4. Les concentrations en quantité de matière d'ions métalliques dans chaque demi-pile varient-elles ? Si oui, comment ?
5. Comment est assurée l'électroneutralité de chaque solution au cours du fonctionnement de la pile ?
6. Établir un tableau d'avancement pour trouver le réactif limitant et la valeur de l'avancement maximal x_{max}.
7. Calculer la capacité de la pile q_{max}.

39 Capacité d'une pile à combustible

En utilisant massivement la combustion d'énergies fossiles, le secteur des transports représente environ 25 % des émissions mondiales de dioxyde de carbone CO_2.

Certains véhicules, dits « zéro émission », utilisent une pile à combustible pour alimenter leur moteur électrique.

Elles utilisent du dihydrogène H_2 stocké dans un réservoir et le dioxygène O_2 de l'air. Si la production de dihydrogène se fait à partir d'énergies renouvelables, ces véhicules sont écologiques car ils ne rejettent que de l'eau par leur pot d'échappement.

L'équation de fonctionnement de la pile est :

$$O_2\,(g) + 2\,H_2\,(g) \rightleftarrows 2\,H_2O\,(g)$$

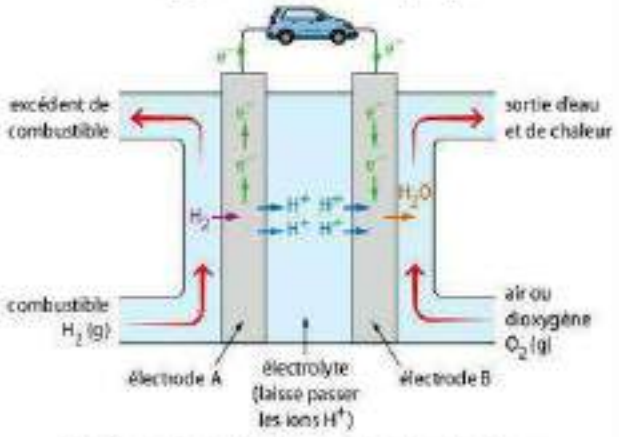


Schéma simplifié d'une « pile à hydrogène »

Un fabricant de voiture indique qu'avec un réservoir de 5 kg de dihydrogène, sa pile à combustible a une capacité d'environ $1,3 \times 10^5$ A · h.

Données : • $M_H = 1,0$ g · mol^{-1} ; 1 A · h = $3,6 \times 10^3$ C
• *Couples oxydant-réducteur :* H^+ (aq) / H_2 (g) ; O_2 (g) / H_2O (g).
• $N_A = 6,02 \times 10^{23}$ mol^{-1} ; $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C

DÉMARCHE EXPERTE

Vérifier l'indication du fabricant.

DÉMARCHE AVANCÉE

1. Calculer la quantité de matière de dihydrogène H_2 (g) contenu dans le réservoir.
2. D'après le schéma et l'équation de fonctionnement de la pile, écrire les demi-équations se produisant aux électrodes A et B.
3. Vérifier l'indication du fabricant.

40 Pile bouton

On considère une pile bouton au lithium dans laquelle interviennent les couples Li^+ (aq) / Li (s) et MnO_2 (s) / MnO (OH) (s). L'électrode de lithium Li (s) constitue la borne – de cette pile.

Données : $M_{Li} = 6,9$ g · mol^{-1} ; $N_A = 6,02 \times 10^{23}$ mol^{-1} ; $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C

1. Écrire les demi-équations électroniques intervenant dans cette pile, puis l'équation de la réaction modélisant le fonctionnement de la pile.
2. Calculer la masse minimale de lithium que doit contenir la pile de capacité 220 mA · h.

À L'ORAL

41 Critère d'évolution spontanée

Soit une réaction d'équation :
A (aq) + B (aq) ⇄ C (aq) + D (aq)

Préparer un exposé oral présentant le critère d'évolution spontanée.

Ce court exposé devra pouvoir être réalisé sans note écrite.

Les mots-clés à utiliser
- direct
- opposé
- équilibre dynamique
- quotient de réaction
- constante d'équilibre

42 RETOUR SUR LA PAGE D'OUVERTURE

Mise au point par des chercheurs français de l'université de Grenoble, cette biopile expérimentale fonctionne, comme nos cellules en utilisant le glucose $C_6H_{12}O_6$ et le dioxygène O_2 contenus dans le sang pour produire de l'énergie électrique selon la transformation d'équation :

$$O_2 + 2\,C_6H_{12}O_6 \rightleftarrows 2\,C_6H_{10}O_5 + 2\,H_2O$$

À terme, on espère pouvoir l'implanter dans le corps humain pour alimenter un pacemaker par exemple, ce qui est nettement plus confortable qu'une pile « classique » (à remplacer au bout 8 ans) pour le patient.

Préparer un exposé oral expliquant pourquoi cette biopile est une source inépuisable d'énergie.



PRÉPA BAC

Développer ses compétences

43 Valeur d'une constante d'équilibre

RÉSOLUTION DE PROBLÈME

30 min

ANALYSER Proposer une stratégie de résolution

De nombreuses espèces chimiques parfumées se forment au cours de transformations lentes et non totales. On se propose de déterminer la valeur de la constante d'équilibre associée à l'équation d'une telle réaction.



DOC 1 Les espèces chimiques en présence

- L'acide éthanoïque $C_2H_4O_2$ est le second constituant du vinaigre, après l'eau. Il lui donne son goût acide et son odeur piquante.
- Le 3-méthylbutan-1-ol, ou alcool isoamylique $C_5H_{12}O$, est un alcool à l'odeur peu prononcée.
- L'éthanoate d'isoamyle $C_7H_{14}O_2$ est une molécule à la forte odeur de banane.

DOC 2 Protocole expérimental

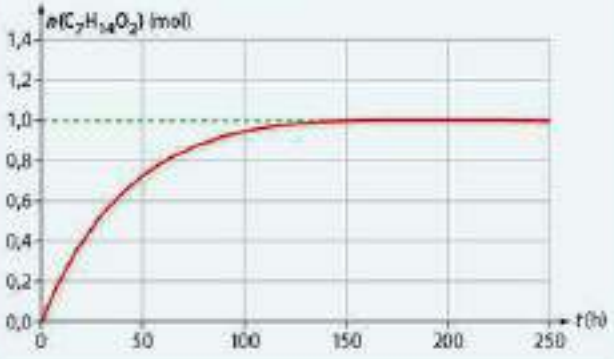
- Dans un ballon, on introduit 90 g d'acide éthanoïque et 132 g d'alcool isoamylique.
- On chauffe à reflux à 100 °C environ.
- Il se produit une réaction au cours de laquelle se forme l'éthanoate d'isoamyle et de l'eau.

DOC 3 Données

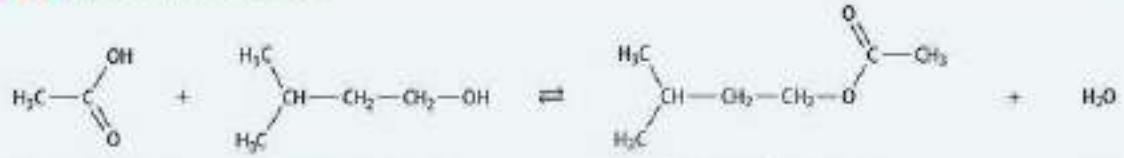
• Masses molaires atomiques du carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène :
$M_C = 12{,}0\ g \cdot mol^{-1}$; $M_H = 1{,}0\ g \cdot mol^{-1}$;
$M_O = 16{,}0\ g \cdot mol^{-1}$.

DOC 4 Mesure de la quantité d'éthanoate d'isoamyle

On mesure au cours du temps l'évolution de la quantité de matière (en mol) d'éthanoate d'isoamyle $n(C_7H_{14}O_2)$.
On obtient le graphique suivant :



DOC 5 Équation de la réaction



QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Après 200 h de chauffage à reflux, l'état d'équilibre dynamique est-il atteint ? Justifier la réponse.
2. Acide éthanoïque ou alcool isoamylique, quel est le réactif limitant ?

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

Quelle est à 100 °C la valeur de la constante d'équilibre K(T) de la réaction étudiée ?

Il est attendu une prise d'initiatives et une présentation de la démarche suivie même s'il elle n'a pas abouti, et de justifier toute réponse.

44 Protéger la coque d'un bateau de la corrosion

RÉSOLUTION DE PROBLÈME

45min

ANALYSE Proposer une stratégie de résolution

On estime que chaque année, environ le quart de la production d'acier est détruit par la corrosion, ce qui correspond à peu près à 5 tonnes d'acier qui rouillent chaque seconde ! La corrosion coûte donc cher (remplacement des matériaux corrodés, revêtement spéciaux, protection par électrode, inspection...), il est important de la limiter au maximum.

DOC 1 La corrosion

La corrosion est un phénomène bien connu des marins. Les bateaux dont la coque est en acier en sont victimes et doivent en être protégés.

Une méthode de protection consiste à poser à la surface de la coque des blocs de métal que l'on appelle *électrodes sacrificielles*.

La corrosion d'un métal M est sa transformation à l'état de cation métallique M^{k+} par réaction avec le dioxygène dissous dans l'eau.

Le métal perd un ou plusieurs électrons, on dit qu'il subit une oxydation ou est oxydé, selon la demi-équation électronique :

$$M = M^{k+} + k\,e^-$$

Une mole de métal oxydé produit k moles d'électrons.



DOC 2 Potentiels standards de différents métaux

Pour prévoir les réactions d'oxydoréduction, on peut s'appuyer en première approche sur l'échelle ci-dessous, appelée échelle des potentiels standards.

Tous les couples oxydant-réducteur peuvent être classés par leur potentiel standard, exprimé en volt (V).

Lorsque deux métaux sont en contact et peuvent être oxydés par le dioxygène, c'est le couple dont le potentiel standard est le plus faible qui s'oxyde : il constitue l'électrode sacrificielle et protège l'autre métal qui ne réagira pas.

Élément métal	Couple oxydant-réducteur	Potentiel standard (en V)
Argent	Ag^+ (aq) / Ag (s)	+ 0,80
Nickel	Ni^{2+} (aq) / Ni (s)	− 0,257
Fer	Fe^{2+} (aq) / Fe (s)	− 0,447
Zinc	Zn^{2+} (aq) / Zn (s)	− 0,760
Aluminium	Al^{3+} (aq) / Al (s)	− 1,67

DOC 3 Protection d'un bateau avec coque en acier

Lors de l'oxydation de l'électrode sacrificielle, il s'établit un courant électrique entre l'électrode et la coque en fer. Ce courant a une intensité moyenne I = 400 mA. Il a son origine dans la charge électrique échangée lors de la réaction d'oxydoréduction.

L'intensité I d'un courant électrique peut s'exprimer en fonction de la charge électrique q échangée au cours de la réaction pendant une durée Δt : $I = \frac{q}{\Delta t}$

Dans le Système international, I s'exprime en ampère (A), q en coulomb (C) et Δt en seconde (s).

DOC 4 Données

- Masse molaire du zinc M = 65,4 g · mol^{-1}.
- Une mole d'électrons possède une charge électrique q :

$$q = N_A \cdot e = 9{,}64 \times 10^4\ C$$

(N_A : constante d'Avogadro ; e : charge élémentaire)

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

Un bateau possède une coque en acier, donc composée essentiellement de fer.

1. Écrire la demi-équation de l'oxydation du fer Fe (s) en considérant uniquement les couples du document 2.
2. Citer parmi les métaux figurant dans le tableau (doc. 2) ceux susceptibles de protéger la coque en acier du bateau. Justifier la réponse. Pourquoi l'électrode utilisée est-elle qualifiée de « sacrificielle » ?

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

On désire protéger la coque en acier d'un bateau par une électrode sacrificielle en zinc.

Quelle masse totale d'électrode sacrificielle en zinc doit-on utiliser pour la protéger de la corrosion pendant une année ?

Il est attendu une prise d'initiatives et une présentation de la démarche suivie même s'il elle n'a pas abouti, et de justifier toute réponse.

45 Capacité électrique d'une pile du commerce

ANALYSE ET SYNTHÈSE DE DOCUMENTS

30 min

APP Rechercher et organiser l'information

Le but de cet exercice est de calculer la capacité électrique d'une pile à partir de sa composition.

DOC 1 Une pile commerciale

Sur cette pile est indiquée sa capacité q_{max} :

$q_{max} = 2\,600$ mA · h



DOC 2 Couples oxydant-réducteur et demi-équations associées

- L'électrode de zinc constitue la borne – de la pile.
- La demi-équation associée au couple Zn^{2+} (aq) / Zn (s) est :

$$Zn^{2+}\,(aq) + 2\,e^- = Zn(s)$$

- La demi-équation associée au couple MnO_2 (s) / MnO(OH) (s) est :

$$MnO_2\,(s) + H_2O\,(\ell) + e^- = MnO(OH)\,(s) + HO^-\,(aq)$$

DOC 3 Données

- $M_{Zn} = 65{,}4$ g · mol^{-1} ; $M_{Mn} = 54{,}9$ g · mol^{-1} ; $M_O = 16$ g · mol^{-1}.
- 1 A · h = $3{,}6 \times 10^3$ C.
- $N_A = 6{,}02 \times 10^{23}$ mol^{-1} ; e = $1{,}6 \times 10^{-19}$ C.

ANALYSE

1. Écrire l'équation de la réaction chimique d'oxydoréduction qui représente le fonctionnement de la pile commerciale.
2. Cette pile commerciale est fabriquée avec 3,1 g de zinc. Quelle masse minimale de dioxyde de manganèse MnO_2 (s) doit être utilisée pour consommer la totalité du zinc ?

SYNTHÈSE

Calculer la capacité électrique de cette pile.
Est-elle cohérente avec l'indication du fabricant ?

VERS LE SUP'

46 Suivi d'une transformation

On se propose de suivre l'évolution d'une transformation et d'en déduire si elle est terminée. Pour cela, on mélange dans un récipient :

- 200 mL de solution aqueuse d'iodure de potassium de concentration en quantité de matière d'ions iodure $[I^-\,(aq)] = 0{,}10$ mol · L^{-1} ;
- 200 mL de solution aqueuse de peroxodisulfate de potassium de concentration en quantité de matière d'ions peroxodisulfate $[S_2O_8^{2-}\,(aq)] = 0{,}40$ mol · L^{-1}.

La réaction qui se produit alors est :

$$S_2O_8^{2-}\,(aq) + 2\,I^-\,(aq) \rightleftarrows 2\,SO_4^{2-}\,(aq) + I_2\,(aq)$$

avec $K(T) = 1{,}3 \times 10^{47}$.

À intervalles de temps réguliers, on détermine, par dosage, la concentration en quantité de matière de diiode formé.

On obtient les valeurs présentées dans le tableau **1**.

1. Quels sont les couples oxydant-réducteur qui interviennent dans cette transformation ?
2. Calculer les quantités de matière initiales des réactifs.
3. Établir le tableau d'avancement du système.
4. À partir du tableau d'avancement, établir les expressions littérales permettant d'exprimer les concentrations de toutes les espèces chimiques présentes, en fonction de la concentration en quantité de matière de diiode à l'instant t.

   Utiliser ces relations pour remplir les quatre premières colonnes du tableau **2** (recopier ce tableau et le compléter jusqu'à t = 74 min).
5. Exprimer le quotient de réaction Q_r et calculer sa valeur à chaque instant t.
6. La réaction est-elle terminée au bout de 74 min ? Justifier la réponse.

Tableau 1

Date (en min)	2	4	8	12	16	20	30	40	60	74
$[I_2]$ (en mol · L^{-1})	5,0	9,2	14,6	18,2	20,8	23	27	29,4	32,5	33,2

Tableau 2

Instant t	$[S_2O_8^{2-}\,(aq)]$	$[I^-\,(aq)]$	$[SO_4^{2-}\,(aq)]$	$[I_2]$	Q_r
0 min					
2 min					
4 min					
...					

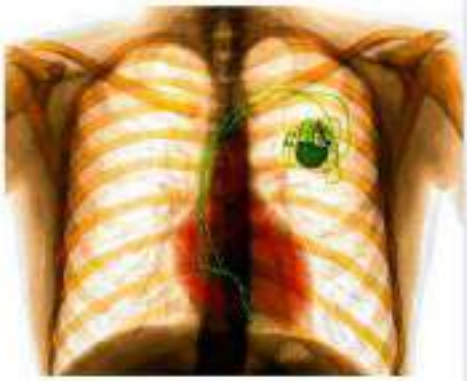
À la date de publication de ce manuel, cette capacité expérimentale est exclue de l'épreuve pratique.

Pacemaker, la pile électrique

Contexte

Le stimulateur cardiaque, ou pacemaker, est un dispositif implanté dans l'organisme qui permet, par exemple, d'accélérer la pulsation du cœur lorsqu'il est trop lent. Au bout d'une certaine durée de fonctionnement (environ 10 ans), la tension à vide de la pile qui l'alimente est trop faible, il faut alors opérer le patient pour changer la pile.

Le but de cette épreuve est de simuler le vieillissement d'une pile afin de vérifier que la tension à vide diminue au cours de son fonctionnement.



Matériel mis à disposition

- Trois solutions aqueuses de sulfate de cuivre contenant des ions Cu^{2+} (aq)
- Trois solutions aqueuses de sulfate de zinc contenant des ions Zn^{2+} (aq)
  (Les six solutions sont de différentes concentrations : 0,010 mol · L^{-1}, 0,10 mol · L^{-1} et 0,20 mol · L^{-1}.)
- Lame de cuivre Cu (s) et lame de zinc Zn (s)
- Pipettes jaugées de 1 mL et 10 mL, fioles jaugées de 50 mL et 100 mL, 6 béchers
- Pont salin : papier imbibé de solution de chlorure de potassium (K⁺ (aq), Cl⁻ (aq))
- Conducteur ohmique, multimètre, fils et pinces crocodile

Travail à effectuer

1. (RÉA) **Réalisation d'une pile cuivre-zinc** *(20 min conseillées)*

1. À partir du matériel disponible, réaliser une pile cuivre-zinc en circuit fermé.
Pour cela, utiliser des solutions ioniques de concentration en quantité de matière 0,10 mol · L^{-1} et placer en série, entre les bornes de la pile, un conducteur ohmique et un ampèremètre branché de façon à ce qu'il indique une valeur positive.
2. Faire un schéma légendé de la pile en fonctionnement et indiquer la borne + et la borne −, le sens du courant électrique, le sens de déplacement des électrons et des ions K^+ (aq) et Cl^- (aq), puis écrire les demi-équations et l'équation de la réaction modélisant la transformation qui se produit dans la pile.

Être en mesure de présenter le montage expérimental et le schéma

2. (ANAL) **Proposition de protocole expérimental** *(10 min conseillées)*

■ À partir du matériel disponible, proposer un protocole expérimental permettant de simuler le vieillissement de la pile et de vérifier que la tension à vide diminue au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'état d'équilibre. Pour cela, fabriquer une nouvelle pile dont la concentration en quantité de matière d'ions consommés est $1{,}0 \times 10^{-4}$ mol · L^{-1} et celle d'ions formés est 0,20 mol · L^{-1}.

Être en mesure de présenter le protocole

3. (RÉA) **Mise en œuvre du protocole expérimental proposé** *(20 min conseillées)*

■ Mettre en œuvre le protocole et effectuer deux mesures.

Être en mesure d'effectuer et de présenter les deux mesures

4. (VAL) **Exploitation du résultat obtenu** *(10 min conseillées)*

1. La simulation du vieillissement de la pile effectuée permet-elle d'affirmer que la tension à vide diminue bien au cours de son fonctionnement ?
2. Au cours de cette expérience, était-il nécessaire de préparer la solution de concentration $1{,}0 \times 10^{-4}$ mol · L^{-1} avec une très grande précision, et d'évaluer l'incertitude-type sur la valeur obtenue ? Justifier la réponse.

Récupérer les solutions dans les récipients prévus à cet effet.
Défaire le montage et ranger la paillasse.

PISTE POUR LE GRAND ORAL PRÉPA BAC

Pour se préparer à l'Oral
➥ Livret LES CLÉS DU BAC
(en début de manuel)

UNE QUESTION

Comment rendre les piles écologiques ?

Enjeu de la question

Chaque année, environ 1 milliard de piles sont vendues en France. Ces piles contiennent des matériaux très dangereux pour l'environnement. Inventer des piles écologiques est un enjeu majeur pour la société.

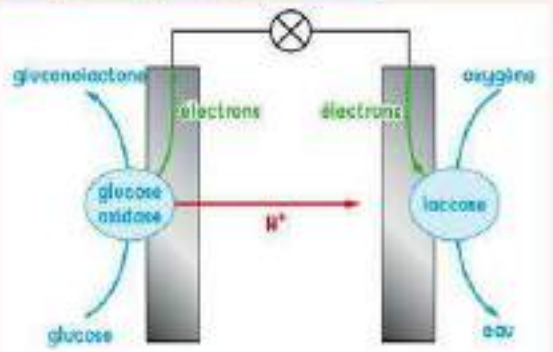
Proposition de plan de présentation

1. Constituants des piles du commerce
2. Les piles « écologiques »
3. Comparaison (prix, faisabilité, performance énergétique, bilan écologique...)

Les mots-clés

recherche ▸ métaux rares ▸ pollution ▸ énergie

Exemple de support de présentation



Biopile au glucose : un exemple de pile écologique

QUESTIONS D'APPROFONDISSEMENT POSSIBLES



UN EXEMPLE DE PROJET PROFESSIONNEL

« Monter sa boîte », « devenir son propre patron »... comment franchir le pas ?

Tous les bacheliers, quelle que soit leur filière d'étude (BTS, IUT, faculté, école d'ingénieur...) peuvent désormais bénéficier du statut d'étudiant-entrepreneur. Ce statut peut permettre de continuer ses études tout en bénéficiant d'aides et d'accompagnement pour créer son entreprise.

Un(e) **entrepreneur(e)** est un(e) chef(fe) d'entreprise. Il (elle) est son propre patron, polyvalent(e) et multitâches, il (elle) peut créer un produit innovant. Un(e) entrepreneur(e) doit être capable de s'investir fortement pour mener à bien son projet, et si l'entreprise s'agrandit, il (elle) crée des emplois et doit être capable de diriger une équipe. Il ne faut pas confondre l'homme (la femme) d'affaires, prioritairement attiré(e) par la maximisation des profits, et l'entrepreneur(e) dont le but est davantage la pérennisation de son activité.

Après le bac : *Bac + 3, après un DUT, licence pro spécialité entrepreneuriat. Bac + 5, master entrepreneuriat et projets innovants.*
Autres métiers : *enseignant(e) chercheur(euse), ingénieur(e) environnement.*



Force des acides

Avant d'aborder le chapitre EN AUTONOMIE

LES ACQUIS INDISPENSABLES

Chapitres 1 et 2

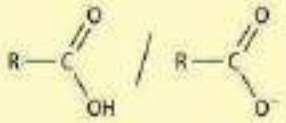
- Un **acide AH** est une espèce capable de libérer un ion hydrogène H^+, une **base A^-** est une espèce capable de capter un ion hydrogène H^+.
- Un acide et sa base conjuguée constituent un couple acide-base.



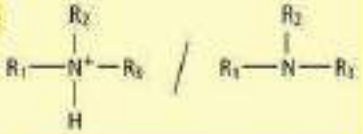
- La **réaction** d'un acide A_1H d'un couple avec la base A_2^- d'un autre couple a pour équation :

$A_1H\,(aq) + A_2^-\,(aq) \rightarrow A_1^-\,(aq) + A_2H\,(aq)$

- Une espèce **amphotère** est une espèce capable de libérer ou capter un ion hydrogène H^+. C'est le cas de l'**eau H_2O** qui appartient à deux couples : $H_3O^+\,(aq) / H_2O\,(\ell)$ et $H_2O\,(\ell) / HO^-\,(aq)$.
- Un **acide carboxylique** est l'acide du couple ci-contre.



- Une **amine** est la base du couple ci-contre.



- Le pH est défini par la relation ci-contre avec $c^\circ = 1\ mol \cdot L^{-1}$, concentration standard.

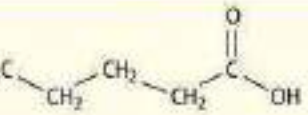
$$pH = -\log\left(\frac{[H_3O^+\,(aq)]}{c^\circ}\right)$$

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

Pour chaque situation, rédiger une réponse qui explique en quelques lignes le raisonnement.

SITUATION 1

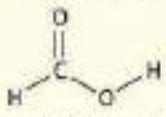
L'acide pentanoïque ci-contre a été initialement isolé dans une plante appelée valériane.



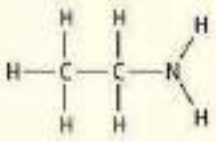
À quel couple acide-base appartient-il ?

SITUATION 2

L'acide méthanoïque



réagit avec l'éthylamine



Quelle est l'équation de la réaction qui modélise cette transformation ?

SITUATION 3

Le pH d'un jus de citron est d'environ 2,5.



Quelle est la concentration en quantité de matière $[H_3O^+\,(aq)]$ des ions oxonium dans cette solution aqueuse ?



CHAPITRE

7

CHIMIE

et des bases



La couleur rouge des boutons floraux de cette plante et la couleur bleue de ses fleurs sont dues au même pigment. Comment expliquer ce changement de couleur durant la floraison ?

– EXERCICE 31

Ipomoea tricolor 'Heavenly Blue'

NOTIONS ET CONTENUS

- Constante d'acidité K_A et produit ionique de l'eau K_e.
- Réaction d'un acide et d'une base avec l'eau, cas limite des acides et bases fortes.
- Diagrammes de prédominance et de distribution. Cas des acides alpha-aminés et des indicateurs colorés.
- Solutions tampon.

CAPACITÉS EXPÉRIMENTALES

- Estimer la valeur de la constante d'acidité d'un couple acide-base à l'aide d'une mesure de pH. – Activité 1
- Mesurer le pH de solutions d'acide ou de base de concentration donnée pour en déduire le caractère fort ou faible de l'acide ou de la base. – Activité 2

CAPACITÉ MATHÉMATIQUE

- Résoudre une équation du second degré. – Activité 3

1. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE

TP

COMPÉTENCES :
REA Effectuer des procédures courantes (calculs)
VAL Interpréter des mesures

Constante d'acidité d'un couple acide-base

Pourquoi certains acides réagissent-ils plus que d'autres avec l'eau ?

DOC 1 Réaction d'un acide avec l'eau

- La réaction d'un acide AH (aq) avec l'eau jouant le rôle de base conduit à un équilibre chimique modélisé par l'équation :

$$AH\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftarrows A^-\,(aq) + H_3O^+\,(aq)$$

- La constante d'équilibre associée est appelée **constante d'acidité** K_A du couple $AH\,(aq) / A^-\,(aq)$:

concentration à l'équilibre de l'espèce A^- (en **mol · L^{-1}**) ; concentration à l'équilibre de H_3O^+ (en **mol · L^{-1}**)

(sans unité)

$$K_A = \frac{[A^-(aq)]_f \cdot [H_3O^+(aq)]_f}{[AH(aq)]_f}$$

concentration à l'équilibre de l'espèce AH (en **mol · L^{-1}**)

DOC 2 Matériel utile

- Solution aqueuse A d'acide éthanoïque $CH_3CO_2H\,(aq)$ de concentration en quantité de matière de soluté apporté : $c_A = 1{,}00 \times 10^{-1}$ mol · L^{-1}.
- pH-mètre étalonné.
- Béchers.
- Fiole jaugée de 100 mL.
- Pipette jaugée de 10,0 mL.



DOC 3 Quelques valeurs de la constante d'acidité K_A à 25 °C

Couple acide-base	K_A
$HCO_2H\,(aq) / HCO_2^-\,(aq)$	$1{,}58 \times 10^{-4}$
$CH_3CO_2H\,(aq) / CH_3CO_2^-\,(aq)$	$1{,}58 \times 10^{-5}$
$NH_4^+\,(aq) / NH_3\,(aq)$	$6{,}31 \times 10^{-10}$

EXPÉRIENCES ET ANALYSE

1 Solution A d'acide éthanoïque à $1{,}00 \times 10^{-1}$ mol · L^{-1}

a. Mesurer le pH de la solution A et en déduire la concentration en ions oxonium $[H_3O^+\,(aq)]$.

b. Justifier que la réaction de l'acide éthanoïque avec l'eau n'est pas totale.

On considère un volume $V = 100$ mL de solution A.

c. Calculer la quantité d'ions oxonium H_3O^+ présents.

d. En considérant que l'eau est un réactif en excès, établir le tableau d'avancement de l'équilibre chimique de l'acide éthanoïque $CH_3CO_2H\,(aq)$ avec l'eau.

2 Solution B d'acide éthanoïque à $1{,}00 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}

a. Écrire puis mettre en œuvre le protocole de préparation d'un volume $V = 100$ mL d'une solution B à partir de la solution A.

b. Reprendre les questions 1 a, c et d pour la solution B.

CONCLUSION

3 **a.** Recopier et compléter le tableau ci-contre, en prenant bien en compte les concentrations effectives des espèces chimiques à l'équilibre.

	Solution A	Solution B
$[CH_3CO_2H\,(aq)]_f$		
$[CH_3CO_2^-\,(aq)]_f$		
$[H_3O^+\,(aq)]_f$		
K_A		

b. Comparer les valeurs de K_A déterminées à celles du document 3 et conclure.

c. De quoi dépend la constante d'acidité d'un couple ?

Je réussis si...

- **Je sais associer à K_A l'équation correspondante.**
- **Je sais estimer la valeur de la constante d'acidité K_A d'un couple acide-base à l'aide d'une mesure de pH.**

TP

COMPÉTENCES :
REA Mettre en œuvre les étapes d'une démarche
VAL Interpréter des mesures

Force des acides et des bases

Pourquoi le pH de solutions d'acides différents mais de même concentration est-il différent ?

DOC 1 Rôle de l'eau

■ L'eau est une espèce amphotère qui peut réagir avec une base en jouant le rôle d'acide, ou avec un acide en jouant le rôle de base. La force d'un acide ou d'une base correspond à sa capacité à réagir avec l'eau.

■ Un acide ou une base est faible si sa réaction avec l'eau n'est pas totale et conduit à un équilibre chimique.
Si la réaction d'un acide (d'une base) avec l'eau est quasi-totale, l'acide (la base) est fort (forte).

■ La réaction entre deux molécules d'eau, l'une jouant le rôle d'acide et l'autre de base conduit à un équilibre appelé autoprotolyse de l'eau et modélisé par l'équation :

$$2\,H_2O\,(\ell) \rightleftarrows H_3O^+\,(aq) + HO^-\,(aq)$$

La constante de cet équilibre est appelée **produit ionique de l'eau** :

$$K_e = \left[H_3O^+\,(aq)\right]_f \cdot \left[HO^-\,(aq)\right]_f$$

À 25 °C, $K_e = 1{,}0 \times 10^{-14}$.

DOC 2 Des solutions courantes d'acides et de bases

■ L'acide chlorhydrique est le nom d'usage de la solution obtenue par dissolution dans l'eau du chlorure d'hydrogène HCl (g). Cette solution (photo) est notée (H_3O^+ (aq), Cl^- (aq)).

■ Une solution d'acide nitrique notée (H_3O^+ (aq), NO_3^- (aq)) est obtenue par dissolution de l'acide nitrique HNO_3 (ℓ) dans l'eau.

■ La soude est le nom d'usage de la solution notée (Na^+ (aq), HO^- (aq)) et obtenue par dissolution dans l'eau d'hydroxyde de sodium NaOH (s).



L'expérience du jet d'eau met en évidence la dissolution du chlorure d'hydrogène dans l'eau. ►

DOC 3 Matériel utile

■ pH-mètre.
■ Béchers.
■ Solutions aqueuses de concentration en quantité de matière de soluté apporté $c = 1{,}0 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.

Acides	
S_1	solution d'acide éthanoïque CH_3CO_2H (aq)
S_2	acide chlorhydrique
S_3	solution d'acide nitrique
Bases	
S_4	soude
S_5	solution d'ammoniac NH_3 (aq)

EXPÉRIENCES ET ANALYSE

1 a. Établir le tableau d'avancement de la réaction avec l'eau d'un acide faible AH (aq) de concentration en quantité de matière apportée c dans une solution de volume V.

b. Mesurer le pH des solutions S_1, S_2 et S_3.

c. Calculer le taux d'avancement final de la réaction de l'acide avec l'eau pour chacune des solutions S_1 à S_3.

2 Reprendre la question **1 a** en considérant une base faible A^- (aq), puis les questions **1 b** et **1 c** pour les solutions S_4 et S_5.

CONCLUSION

3 a. En déduire le caractère fort ou faible des acides et des bases du **document 3**.

b. En utilisant le formalisme adapté, écrire les équations des réactions avec l'eau de l'acide éthanoïque, du chlorure d'hydrogène, de l'acide nitrique et de l'ammoniac.

Je réussis si...

- **Je sais associer le caractère fort d'un acide (d'une base) à la transformation quasi-totale de cet acide (cette base) avec l'eau.**
- **Je sais déduire d'une mesure de pH le caractère fort ou faible d'un acide et d'une base**

TP

COMPÉTENCES :
(AN/RAI) Faire des prévisions à l'aide d'un modèle
(VAL) Effectuer des procédures courantes (calculs)

Composition d'un vinaigre



SITUATION-PROBLÈME

Le vinaigre blanc possède des propriétés fongicides permettant de lutter contre une maladie affectant le blé : la carie. Son utilisation phytosanitaire est autorisée si son degré n'excède pas 10°.

Quelle est la composition réelle d'un vinaigre à 10 degrés ?

HYPOTHÈSE Proposer une hypothèse en la justifiant.

DOC 1 Le vinaigre blanc

Le vinaigre blanc est une solution aqueuse d'acide éthanoïque CH_3CO_2H (aq). Sa masse volumique est $\rho = 1{,}01\ g \cdot mL^{-1}$.

Le degré d'un vinaigre correspond à la masse, en grammes, d'acide éthanoïque contenue dans 100 g de vinaigre.

L'acide éthanoïque est l'acide du couple CH_3CO_2H (aq) / $CH_3CO_2^-$ (aq) de constante d'acidité $K_A = 1{,}58 \times 10^{-5}$ à 25 °C.

Données :

- *Masses molaires atomiques : $M_H = 1{,}0\ g \cdot mol^{-1}$; $M_C = 12{,}0\ g \cdot mol^{-1}$; $M_O = 16{,}0\ g \cdot mol^{-1}$.*

DOC 2 Résolution d'une équation du second degré

– Fiche MATHS p. 534

Soit dans $\mathbb{R}$ l'équation $A \cdot X^2 + B \cdot X + C = 0$.

On calcule la valeur du discriminant $\Delta = B^2 - 4A \cdot C$.

– Si $\Delta = 0$, il y a une seule solution : $X = \dfrac{-B}{2A}$.

– Si $\Delta > 0$, il y a deux solutions : $\dfrac{-B - \sqrt{\Delta}}{2A}$ ou $\dfrac{-B + \sqrt{\Delta}}{2A}$

En physique-chimie, le signe de X est parfois connu et peut permettre d'écarter une des deux solutions mathématiques.

– Si $\Delta < 0$, pas de solutions réelles.

DOC 3 Détermination par Python du taux d'avancement final

Ce programme permet de calculer le taux d'avancement final τ de la transformation modélisée par la réaction d'un acide sur l'eau.

```
import math
c = float(input("c = "))    # On demande la valeur de la concentration c en acide apportée.
while c <= 0: # On vérifie que c est strictement positif
    print ("c doit être strictement positif")
    c = float(input("c = "))    # On demande à nouveau la valeur de c.
KA = float(input("KA = "))  # On demande la valeur de la constante d'acidité KA du couple acide-base.
while KA <= 0: # On vérifie que KA est strictement positif
    print ("KA doit être strictement positif")
    KA = float(input("KA = "))    # On demande à nouveau la valeur de KA.
delta = KA**2 + 4*c*KA # On calcule le discriminant delta, forcément positif car c et KA positifs.
  L'équation a donc deux solutions dont une seule positive que l'on retient.
to = (-KA + math.sqrt(delta)) /(2*c)
print ("Le taux d'avancement final est to = ",to, )
```

PISTES DE RÉSOLUTION

1 Déterminer la concentration c en quantité de matière d'acide éthanoïque dans un vinaigre à 10°.

2 Montrer que le taux d'avancement final τ de la transformation entre l'acide éthanoïque et l'eau dans ce vinaigre obéit à l'équation :

$$c \cdot \tau^2 + K_A \cdot \tau - K_A = 0$$

CONCLUSION

3 a. Résoudre cette équation.

b. Retrouver le résultat obtenu à l'aide du document 3.

4 En déduire les concentrations effectives des espèces présentes dans ce vinaigre.

Je réussis si...

- **Je sais résoudre une équation du second degré.**
- **Je sais déterminer, à l'aide d'un langage de programmation, le taux d'avancement final de la transformation entre un acide et l'eau.**
- **Je sais prévoir la composition finale d'une solution aqueuse d'acide.**

4. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE

TP

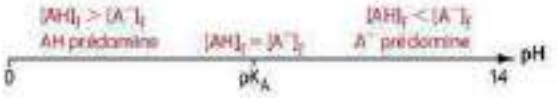
COMPÉTENCES :
(RÉA) Utiliser un modèle
(VAL) Confronter un modèle à des résultats expérimentaux

Diagrammes d'un couple acide-base

Comment estimer la composition d'une solution d'acide ?

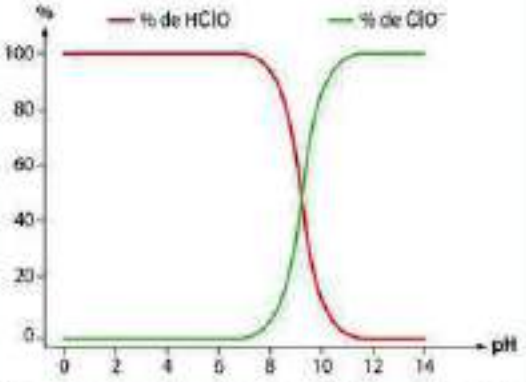
DOC 1 Diagramme de prédominance

Un diagramme de prédominance est représenté par un axe de pH sur lequel apparaissent la valeur du pK_A d'un couple acide-base et les domaines où les espèces conjuguées prédominent.
L'espèce X prédomine sur l'espèce Y si [X] > [Y].



DOC 2 Approche du diagramme de distribution par Python

Un diagramme de distribution est un graphique qui représente les pourcentages d'un acide et de sa base conjuguée en fonction de la valeur du pH, par exemple ci-dessous, le diagramme de distribution du couple HClO (aq) / ClO^- (aq).



Le programme en langage Python permet de tracer le diagramme de distribution d'un couple acide-base, il sera fourni par le professeur.

DOC 3 Indicateur coloré et titrage

Un indicateur coloré est une solution contenant un couple acide-base noté IndH / Ind^- dont l'acide et la base conjuguée ont des teintes différentes.

Sa zone de virage correspond à l'intervalle de pH dans lequel il passe d'une teinte à l'autre. Il peut être utilisé pour déterminer l'équivalence d'un titrage acide-base si le pH à l'équivalence est compris dans sa zone de virage.

Par exemple, le rouge de méthyle est un indicateur coloré de $pK_A = 5,0$, sa teinte acide A est rouge et sa teinte basique B est jaune.





EXPLOITATION ET ANALYSE

1 a. Représenter le diagramme de prédominance du rouge de méthyle.

b. Quelle forme du rouge de méthyle prédomine dans une solution de pH = 8,2 ? Quelle est sa teinte ?

c. Reprendre la question 1 b pour de l'acide chlorhydrique dont la concentration en quantité de matière est $c = 1,0 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.

2 a. À l'aide du programme Python fourni par le professeur, tracer le diagramme de distribution du rouge de méthyle.

b. Déterminer sa zone de virage qui correspond à un pourcentage de base compris entre 20 % et 90 %.

c. Justifier que cet indicateur coloré convient pour un titrage acide-base dont le pH à l'équivalence est 5,3.

SYNTHÈSE

3 Expliquer l'intérêt des diagrammes de prédominance et de distribution.

Je réussis si...

- **Je sais représenter le diagramme de prédominance d'un couple acide-base.**
- **Je sais exploiter un diagramme de prédominance ou de distribution.**
- **Je sais justifier le choix d'un indicateur coloré lors d'un titrage.**

1 Réaction avec l'eau

■ L'eau est une espèce amphotère qui peut réagir avec une base en jouant le rôle d'acide, ou avec un acide en jouant le rôle de base.

Produit ionique de l'eau K_e

Deux molécules d'eau peuvent même réagir ensemble, l'une jouant le rôle d'acide et l'autre de base. Cette transformation conduit à un équilibre chimique appelé **autoprotolyse de l'eau**, modélisé par l'équation :

$$2\,H_2O\,(\ell) \rightleftarrows H_3O^+\,(aq) + HO^-\,(aq)$$

La constante d'équilibre de l'autoprotolyse de l'eau est appelée **produit ionique** de l'eau, noté K_e :

$$K_e = [H_3O^+\,(aq)]_f \cdot [HO^-\,(aq)]_f$$

où $[X]_f$ est la concentration en quantité de matière à l'équilibre de l'espèce X, en mol · L^{-1}.
On lui associe la grandeur pK_e donnée par la relation $\mathbf{pK_e = -\log K_e}$.

UN PONT VERS LES MATHS

Convention
Pour une grandeur X :

$$pX = -\log X$$

et : $X = 10^{-pX}$

Donc :

$$pK_e = -\log K_e$$

et : $K_e = 10^{-pKe}$

→ Fiche MATHS p. 532

■ À 25 °C, $K_e = 1{,}0 \times 10^{-14}$ et $pK_e = 14$. Ainsi, lorsque la concentration $[H_3O^+\,(aq)]_f$ en ions oxonium augmente, la concentration $[HO^-\,(aq)]_f$ en ions hydroxyde diminue et inversement.

Acides faibles et bases faibles

Un acide faible AH (respectivement une base faible A^-) ne réagit pas totalement avec l'eau : la transformation conduit à un équilibre chimique.

■ Les acides carboxyliques sont des acides faibles tandis que les amines sont des bases faibles.

EXEMPLES

- Présent dans le vinaigre blanc, l'acide éthanoïque $CH_3CO_2H\,(aq)$ (FIG. 1) est un acide faible :

$$CH_3CO_2H\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftarrows CH_3CO_2^-\,(aq) + H_3O^+\,(aq)$$

- L'ammoniac $NH_3\,(aq)$ est une base faible :

$$NH_3\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftarrows NH_4^+\,(aq) + HO^-\,(aq)$$



FIG. 1 Le vinaigre contient de l'acide éthanoïque

Constante d'acidité K_A d'un couple acide-base

La transformation d'un acide AH (aq) avec l'eau jouant le rôle de base conduit à un **équilibre chimique** modélisé par l'équation :

$$AH\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftarrows A^-\,(aq) + H_3O^+\,(aq)$$

La constante d'équilibre associée est appelée **constante d'acidité** du couple AH (aq) / A^- (aq), notée : $K_A = \dfrac{[A^-\,(aq)]_f \cdot [H_3O^+\,(aq)]_f}{[AH\,(aq)]_f}$

où $[X]_f$ désigne la concentration à l'équilibre de l'espèce X, en mol · L^{-1}.

■ Pour chaque couple acide-base, on associe à la constante d'acidité la grandeur pK_A, donnée par la relation $\mathbf{pK_A = -\log K_A}$.

■ Le pK_A d'un couple acide faible / base faible est compris entre 0 et pK_e. C'est une grandeur caractéristique de chaque couple acide-base et qui ne dépend que de la température du milieu (FIG. 2).

Couple acide-base	pK_A	K_A
$H_3O^+\,(aq) / H_2O\,(\ell)$	0,0	1,0
$HCO_2H\,(aq) / HCO_2^-\,(aq)$	3,8	$1{,}58 \times 10^{-4}$
$CH_3CO_2H\,(aq) / CH_3CO_2^-\,(aq)$	4,8	$1{,}58 \times 10^{-5}$
$NH_4^+\,(aq) / NH_3\,(aq)$	9,2	$6{,}31 \times 10^{-10}$

FIG. 2 Quelques couples acide-base et leurs valeurs de pK_A et K_A à 25 °C.

Force d'un acide ou d'une base

■ La force d'un acide ou d'une base correspond à sa capacité à réagir avec l'eau.

Plus le pK_A d'un couple acide-base est grand, moins l'acide réagit avec l'eau, moins l'acide est fort et plus la base conjuguée est forte (FIG. 3).
La transformation de certains acides avec l'eau est **quasi-totale** : ce sont des **acides forts**. L'acide nitrique et l'acide chlorhydrique sont des acides forts.

■ Le pK_A du couple associé à un acide fort est négatif ou nul.

■ La base conjuguée d'un acide fort n'a pas tendance à capter un proton. On dit que c'est une base indifférente dans l'eau : c'est le cas par exemple des ions chlorure Cl^- (aq) et des ions nitrate NO_3^- (aq).

La transformation de certaines bases avec l'eau est **quasi-totale** : ce sont des **bases fortes**. L'hydroxyde de sodium appelé soude est une base forte.

■ Le pK_A du couple associé à une base forte est supérieur ou égal à pK_e. L'acide conjugué d'une base forte ne réagit pas avec l'eau.

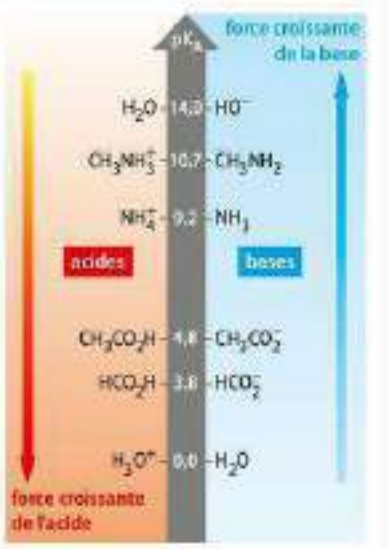


FIG. 3 Force des acides et bases selon leur pK_A à 25 °C.

2 Solutions d'acide ou de base

■ Une solution aqueuse d'acide ou de base de concentration donnée n'a pas le même pH selon la force de l'acide ou de la base considéré. Dans le cas d'un acide, la connaissance de la valeur du pK_A du couple et de la concentration en acide apporté permet de prévoir la composition finale de la solution aqueuse.

Solution aqueuse d'acide fort

■ Dans une solution aqueuse de volume V, la transformation d'un acide fort AH de concentration apportée c avec l'eau est quasi-totale, ce qui permet d'établir le tableau d'avancement suivant :

État du système	Avancement	AH (aq)	+ H_2O (ℓ)	→ A^- (aq)	+ H_3O^+ (aq)
initial	0	$c \cdot V$	excès	0	0
en cours	x	$c \cdot V - x$	excès	x	x
final	x_{max}	$c \cdot V - x_{max} = 0$	excès	$x_{max} = c \cdot V$	$x_{max} = c \cdot V$

À l'état final, on a donc :

$$[AH\,(aq)]_f = 0 \text{ et } [A^-\,(aq)]_f = [H_3O^+\,(aq)]_f = c.$$

Le **pH** d'une solution aqueuse d'**acide fort** de concentration en quantité de matière d'acide apporté c (en $mol \cdot L^{-1}$) vaut :

$$pH = -\log c$$

EXEMPLE

Dans de l'acide chlorhydrique (H_3O^+ (aq), Cl^- (aq)), à la concentration $c = 1{,}0 \times 10^{-2}\ mol \cdot L^{-1}$, on a : $[Cl^-\,(aq)]_f = [H_3O^+\,(aq)]_f = c = 1{,}0 \times 10^{-2}\ mol \cdot L^{-1}$ et $pH = -\log [H_3O^+\,(aq)]_f = -\log (1{,}0 \times 10^{-2})$, soit $pH = 2{,}0$.

■ La relation $pH = -\log c$ correspond au cas limite où la transformation de l'acide avec l'eau est totale. Si la mesure expérimentale du pH ne vérifie pas cette égalité, alors cette transformation n'est pas totale, l'acide considéré est faible.

RAPPELS

▸ Sur les flacons des solutions sont notées les concentrations en soluté apporté. Elles indiquent les espèces chimiques utilisées pour préparer la solution, mais pas nécessairement celles effectivement présentes dans la solution.

Solution aqueuse de base forte

■ Dans une solution aqueuse de volume V, la transformation d'une base forte A^- de concentration en quantité de matière apportée c avec l'eau est quasi-totale selon la réaction d'équation :

$$A^- (aq) + H_2O (\ell) \rightarrow AH (aq) + HO^- (aq)$$

À l'état final, on a donc : $[A^- (aq)]_f = 0$ et $[AH (aq)]_f = [HO^- (aq)]_f = c$.

Le produit ionique de l'eau permet de calculer $[H_3O^+ (aq)]_f = \dfrac{K_e}{[HO^- (aq)]_f} = \dfrac{K_e}{c}$ et d'en déduire le $pH = -\log \dfrac{K_e}{c} = -\log K_e + \log c = pK_e + \log c$.

Le **pH** d'une solution aqueuse de **base forte** de concentration en quantité de matière de base apportée c (en $mol \cdot L^{-1}$) vaut : $\mathbf{pH = pK_e + \log c}$

EXEMPLE

À 25 °C, dans de la soude $(Na^+ (aq), HO^- (aq))$ (FIG. 4), à la concentration $c = 1{,}0 \times 10^{-2}\ mol \cdot L^{-1}$, on a : $[Na^+ (aq)]_f = [HO^- (aq)]_f = c = 1{,}0 \times 10^{-2}\ mol \cdot L^{-1}$.
Son pH vaut : $pH = pK_e + \log c = 14 + \log (10^{-2}) = 14 - 2$, soit $pH = 12$.

■ La relation $\mathbf{pH = pK_e + \log c}$ correspond au cas limite où la transformation de la base avec l'eau est totale. Si la mesure expérimentale du pH ne vérifie pas cette égalité, alors cette transformation n'est pas totale, la base considérée est faible.



FIG. 4 Ce déboucheur de canalisations est une solution aqueuse de base forte (soude).

Solution aqueuse d'acide faible

■ Dans une solution aqueuse de volume V, la transformation d'un acide faible AH de concentration apportée c avec l'eau est modélisée par l'équilibre suivant :

État du système	Avancement	$AH (aq)$	+	$H_2O (\ell)$	⇄	$A^- (aq)$	+	$H_3O^+ (aq)$
initial	0	$c \cdot V$		excès		0		0
en cours	x	$c \cdot V - x$		excès		x		x
final	x_f	$c \cdot V - x_f$		excès		x_f		x_f

■ L'avancement maximal est $x_{max} = c \cdot V$, donc $c = \dfrac{x_{max}}{V}$.

Le taux d'avancement final est $\tau = \dfrac{x_f}{x_{max}}$, donc $x_f = x_{max} \cdot \tau$.

La concentration effective de chacune des espèces présentes est :

$$[A^- (aq)]_f = [H_3O^+ (aq)]_f = \frac{x_f}{V} = \frac{x_{max} \cdot \tau}{V} = c \cdot \tau ;$$

$$[AH (aq)]_f = \frac{c \cdot V - x_f}{V} = \frac{x_{max} - x_{max} \cdot \tau}{V} = \frac{x_{max} \cdot (1 - \tau)}{V} = c \cdot (1 - \tau).$$

La constante d'acidité K_A du couple s'écrit donc $K_A = \dfrac{(c \cdot \tau)^2}{c \cdot (1 - \tau)}$.

On en déduit l'équation du second degré suivante :

$$c \cdot \tau^2 + K_A \cdot \tau - K_A = 0$$

dont la résolution permet de calculer le taux d'avancement final (FIG. 5) et de prévoir la composition de la solution à l'équilibre.

EXEMPLE

La composition d'une solution aqueuse de concentration en acide éthanoïque $CH_3CO_2H (aq)$ apporté $c = 1{,}0 \times 10^{-3}\ mol \cdot L^{-1}$ est :
$[CH_3CO_2^- (aq)]_f = [H_3O^+ (aq)]_f = c \cdot \tau = 1{,}0 \times 10^{-3} \times 0{,}118 = 1{,}2 \times 10^{-4}\ mol \cdot L^{-1}$
$[CH_3CO_2H (aq)]_f = c \cdot (1 - \tau) = 1{,}0 \times 10^{-3} \times (1 - 0{,}118) = 8{,}8 \times 10^{-4}\ mol \cdot L^{-1}$

UN PONT VERS LES MATHS

Résolution d'équation

• Résolvons l'équation du second degré :

$$c \cdot \tau^2 + K_A \cdot \tau - K_A = 0$$

• Pour cela, déterminons l'expression du discriminant Δ :

$$\Delta = K_A^2 + 4 K_A \cdot c$$

Si $\Delta > 0$, il y a deux solutions :

$$\frac{-K_A - \sqrt{\Delta}}{2c} \text{ ou } \frac{-K_A + \sqrt{\Delta}}{2c}$$

Le taux d'avancement final étant positif, on retient :

$$\tau = \frac{-K_A + \sqrt{\Delta}}{2c}$$

→ Fiche MATHS p. 534

Pour une solution de concentration donnée en acide faible apporté, **plus la valeur de K_A du couple acide-base est grande, moins cet acide est faible**, plus le taux d'avancement final de la transformation avec l'eau est grand (FIG. 5).

Acide faible	K_A	Taux d'avancement final τ (en %)
HCO_2H	$1{,}58 \times 10^{-4}$	32,7
CH_3CO_2H	$1{,}58 \times 10^{-5}$	11,8
NH_4^+	$6{,}31 \times 10^{-10}$	0,08

FIG. 5 Taux d'avancement final de la transformation de quelques acides de concentration $1{,}0 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1} avec l'eau à 25 °C.

Solution tampon

Une **solution tampon** est une solution dont le **pH varie peu** par addition d'une petite quantité d'acide ou de base, et par dilution modérée.

EXEMPLE

Soit A une solution aqueuse équimolaire d'acide éthanoïque et d'ions éthanoate à 0,1 mol · L^{-1}, B une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium à 0,1 mol · L^{-1} et C une solution de chlorure de sodium. Les valeurs obtenues après ajout d'une faible quantité d'acide ou par dilution modérée montrent que seule la solution A est une solution tampon (FIG. 6).

	pH_0	pH_1	pH_2
A	4,8	4,7	4,8
B	13,0	12,9	12,0
C	6,5	2	6,5

FIG. 6 Valeurs de pH des solutions A, B et C.
- pH_0 : valeur initiale.
- pH_1 : après ajout d'une petite quantité d'acide chlorhydrique.
- pH_2 : après dilution modérée.

■ Les solutions tampons permettent de contrôler la valeur du pH, par exemple lors de l'étalonnage d'un pH-mètre.

3 Diagrammes d'un couple

■ L'expression de la constante d'acidité d'un couple acide-base permet d'exprimer le pH en fonction du pK_A du couple :

$$-\log(K_A) = -\log\left(\frac{[A^-(aq)]_f \cdot [H_3O^+(aq)]_f}{[AH(aq)]_f}\right)$$

$$-\log(K_A) = -\log\left(\frac{[A^-(aq)]_f}{[AH(aq)]_f}\right) - \log[H_3O^+(aq)]_f$$

$$pK_A = -\log\frac{[A^-(aq)]_f}{[AH(aq)]_f} + pH \text{ soit } pH = pK_A + \log\frac{[A^-(aq)]_f}{[AH(aq)]_f}$$

Le pK_A d'un couple AH (aq) / A^- (aq) est lié au pH de la solution par la relation :

$$\mathbf{pH = pK_A + \log\frac{[A^-(aq)]_f}{[AH(aq)]_f}}$$

UN PONT VERS LES MATHS

Propriétés de la fonction log
- Si B = D × E, alors :
$$\log B = \log(D \times E)$$
- $\log(D \times E) = \log D + \log E$

→ Fiche MATHS p. 532

Diagramme de prédominance

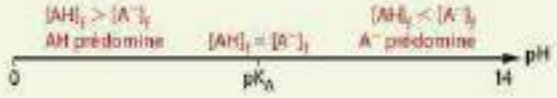
■ L'espèce X prédomine sur l'espèce Y si [X] > [Y].

Si l'acide prédomine sur sa base conjuguée, $\frac{[A^-]_f}{[AH]_f} < 1$, donc $\log\left(\frac{[A^-]_f}{[AH]_f}\right) < 0$.

De la relation $pH = pK_A + \log\left(\frac{[A^-]_f}{[AH]_f}\right)$, on déduit que $pH < pK_A$.

La forme acide prédomine donc lorsque le pH est inférieur au pK_A du couple.

Le **diagramme de prédominance** d'un couple acide-base (FIG. 7) est un axe de pH sur lequel apparaissent la valeur du pK_A du couple et les domaines où les espèces conjuguées prédominent.



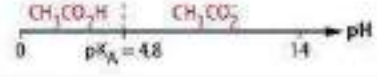


FIG. 7 Diagramme de prédominance du couple acide éthanoïque / ion éthanoate.

Diagramme de distribution

Le **diagramme de distribution** (Fig. 8) qui représente les pourcentages d'un acide et de sa base conjuguée en fonction de la valeur du pH, permet de connaître la composition d'une solution.

■ Lorsque acide et base conjuguée sont en proportions égales (50 %), le pH est égal au pK_A du couple.

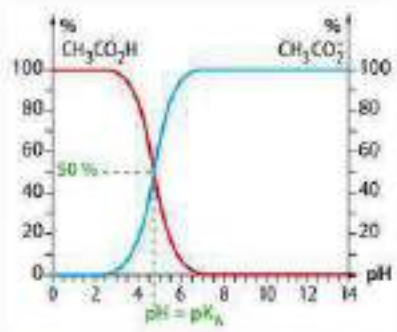


Fig. 8 Diagramme de distribution du couple acide éthanoïque / ion éthanoate.

Cas des indicateurs colorés

Un **indicateur coloré** est une solution contenant un couple dont l'acide et la base conjuguée ont des teintes différentes. Sa **zone de virage** correspond à l'intervalle de pH dans lequel il passe d'une teinte à l'autre (Fig. 9).



Un indicateur coloré peut être utilisé pour déterminer l'équivalence d'un titrage acide-base si **le pH à l'équivalence se situe dans sa zone de virage** (Fig. 10).

Nom	Teinte acide	Zone de virage	Teinte basique
Hélianthine	rouge	3,1 – 4,4	jaune
Rouge de méthyle	rouge	4,2 – 6,2	jaune
Bleu de bromothymol (BBT)	jaune	6,0 – 7,6	bleu
Thymolphtaléine	incolore	9,3 – 10,5	bleu

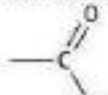
Fig. 9 Zone de virage de quelques indicateurs colorés.

EXEMPLE

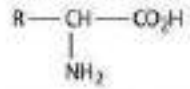
Le pH à l'équivalence lors du titrage de la soude par l'acide chlorhydrique vaut 7,0. L'indicateur coloré adapté est le bleu de bromothymol (BBT), la solution titrée est bleue avant l'équivalence et jaune après l'équivalence.

Cas des acides alpha-aminés

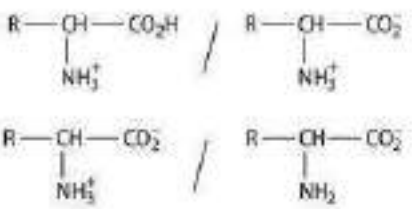
■ Les acides alpha-aminés sont des molécules organiques qui constituent les protéines. Elles comportent, sur un même atome de carbone, un groupe



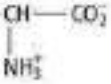
carboxyle OH responsable de leur caractère acide et un groupe amine $-NH_2$ responsable de leur caractère basique, R étant une chaîne carbonée :

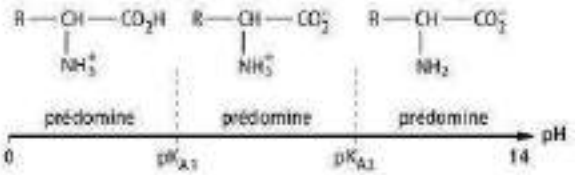


■ Un acide alpha-aminé appartient donc à au moins deux couples acide-base auxquels on associe respectivement les grandeurs pK_{A1} et pK_{A2} :



avec $pK_{A1} < pK_{A2}$.

■ Le diagramme de prédominance suivant montre que la forme  n'est jamais prédominante quelle que soit la valeur du pH.



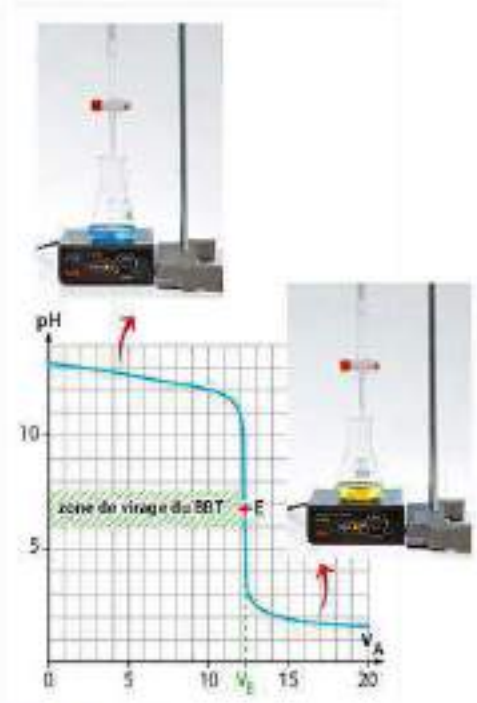


Fig. 10 Titrage de la soude par l'acide chlorhydrique en présence de bleu de bromothymol (BBT).

1 Réaction avec l'eau

Équation de l'autoprotolyse de l'eau :

$$2\,H_2O\,(\ell) \rightleftarrows H_3O^+\,(aq) + HO^-\,(aq)$$

Produit ionique de l'eau K_e :

$$K_e = [H_3O^+\,(aq)]_f \cdot [HO^-\,(aq)]_f$$

Constante d'acidité K_A :

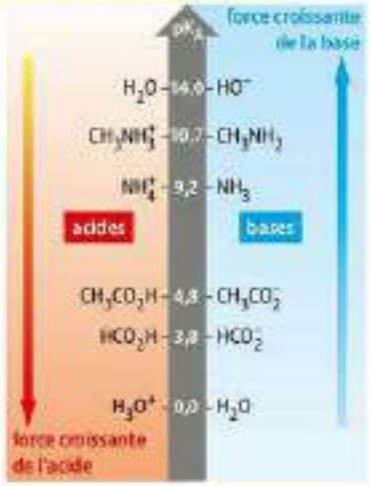
Soit l'équation $AH\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftarrows A^-\,(aq) + H_3O^+\,(aq)$

alors : $$K_A = \frac{[A^-\,(aq)]_f \cdot [H_3O^+\,(aq)]_f}{[AH\,(aq)]_f}$$

Réaction d'un acide ou d'une base avec l'eau :

- si équilibre chimique → acide faible ou base faible
- si la réaction est totale → acide fort ou base forte

Force des acides et des bases :



2 Solutions d'acide ou de base

Solution d'acide

↳ **forte**

si **$pH = -\log c$**

$[AH\,(aq)]_f = 0$

$[A^-\,(aq)]_f = [H_3O^+\,(aq)]_f = c$

↳ **faible**

si $pH \neq -\log c$

composition donnée par la résolution de l'équation

$$c \cdot \tau^2 + K_A \cdot \tau - K_A = 0$$

c est la concentration en quantité de matière d'acide apporté

Solution de base

↳ **forte**

si **$pH = pK_e + \log c$**

↳ **faible**

si $pH \neq pK_e + \log c$

Solution tampon

Son pH varie peu par addition d'une petite quantité d'acide ou de base, et par dilution modérée.

3 Diagrammes d'un couple

Diagramme de prédominance



Application aux acides alpha-aminés

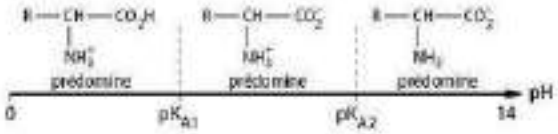
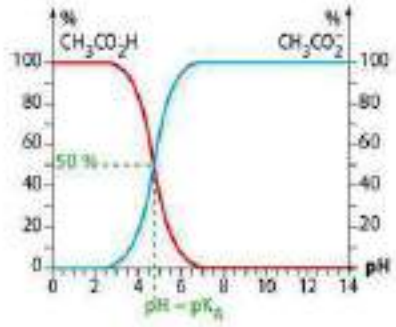
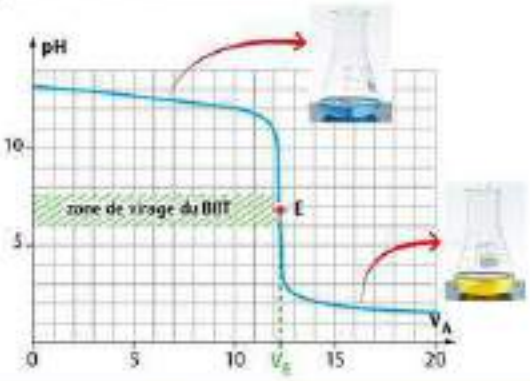


Diagramme de distribution



Application aux indicateurs colorés



Vérifier l'essentiel

EN AUTONOMIE

Pour chaque question, choisir la ou les bonnes réponses. ➡ SOLUTIONS EN PAGE 593

Flash PAGE corrigés détaillés

Flash PAGE QCM interactifs

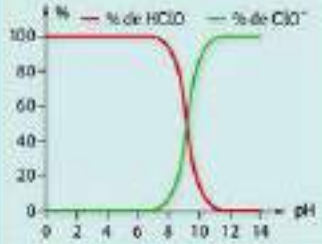
1 Réaction avec l'eau

	A	B	C
1 Le produit ionique de l'eau Ke :	correspond à la constante de l'équilibre : $H_3O^+(aq) + HO^-(aq) \rightleftarrows 2\,H_2O(\ell)$	a pour expression : $K_e = [H_3O^+(aq)]_f \cdot [HO^-(aq)]_f$	a pour valeur $K_e = 1{,}0 \times 10^{14}$ si $pK_e = 14$ à 25 °C.
2 La constante d'acidité d'un couple AH (aq) / A^- (aq) :	correspond à la réaction de l'acide AH avec sa base conjuguée A^-.	correspond à la constante de l'équilibre : $AH(aq) + H_2O(\ell) \rightleftarrows A^-(aq) + H_3O^+(aq)$	a pour expression : $K_A = \dfrac{[A^-(aq)]_f \cdot [H_3O^+(aq)]_f}{[AH(aq)]_f}$
3 Une espèce chimique :	acide ou base est forte si sa transformation avec l'eau est totale.	$A^-(aq)$ est une base faible si : $A^-(aq) + H_2O(\ell) \rightleftarrows AH(aq) + HO^-(aq)$	AH (aq) est un acide fort si : $AH(aq) + H_2O(\ell) \rightleftarrows A^-(aq) + H_3O^+(aq)$

2 Solution d'acide ou de base

	A	B	C
4 Dans une solution d'acide nitrique de concentration $c = 1{,}0 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1} :	$[HNO_3(\ell)]_f = 1{,}0 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1}	$[NO_3^-(aq)]_f = [H_3O^+(aq)]_f = 1{,}0 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1}	pH = 3,0
5 Pour une solution d'acide éthanoïque de concentration $c = 1{,}0 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1} :	$[CH_3CO_2H(aq)]_f = 1{,}0 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}	pH = 2,0	on peut prévoir sa composition en résolvant une équation du 2nd degré
6 Le pH d'une solution tampon varie peu par :	addition d'une petite quantité d'acide.	addition d'une petite quantité de base.	dilution modérée.

3 Diagramme d'un couple

	A	B	C
7 Ce graphique : 	est un diagramme de prédominance.	est un diagramme de distribution.	permet d'estimer la composition en acide et base conjuguée d'une solution selon le pH.
8 Un indicateur coloré :	possède deux teintes différentes selon le pH.	a ce type de diagramme de prédominance : 	convient à un titrage acide-base si le pH à l'équivalence est compris dans sa zone de virage.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Acquérir les bases

1 Réaction avec l'eau

EN AUTONOME

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Constante d'acidité K_A d'un couple acide-base, produit ionique de l'eau K_e

- Associer K_A et K_e aux équations de réactions correspondantes.

Acquérir les bases : 13 S'entraîner : 31

Réaction d'un acide ou d'une base avec l'eau, cas limite des acides forts et des bases fortes dans l'eau

- Associer le caractère fort d'un acide (ou d'une base) à la transformation quasi-totale de cet acide (ou cette base) avec l'eau.

Acquérir les bases : 13 S'entraîner : 37

DONNÉE

- Produit ionique de l'eau : $K_e = 1{,}0 \times 10^{-14}$ à 25 °C.

9 Produit ionique de l'eau

1. Donner l'expression du produit ionique de l'eau K_e.

2. Écrire l'équation chimique de l'équilibre dont K_e est la constante.

10 Constante d'acidité d'un couple acide-base

L'ammoniac NH_3 (aq) est une base faible utilisée dans la composition des engrais.

1. Écrire l'équation chimique de l'équilibre dont K_A est la constante.

2. Donner l'expression de la constante d'acidité K_A du couple NH_4^+ (aq) / NH_3 (aq).

3. Calculer la valeur de cette constante K_A à 25 °C sachant que $pK_A = 9{,}2$ à cette température.

11 Quelques boissons

Recopier et compléter le tableau suivant en calculant les valeurs manquantes. Les valeurs sont données à la température de 25 °C, les concentrations en quantité de matière sont exprimées en mol · L^{-1}.

Boisson	Jus de pomme	Lait	Eau minérale	Soda au cola
pH	3,2			2,5
$[H_3O^+(aq)]_f$		$2{,}0 \times 10^{-7}$		
$[HO^-(aq)]_f$			$3{,}1 \times 10^{-7}$	

12 L'acide perchlorique

L'acide perchlorique $HClO_4$ réagit avec l'eau selon l'équation chimique :

$$HClO_4\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightarrow ClO_4^-\,(aq) + H_3O^+\,(aq)$$

1. Quel est le couple acide-base auquel appartient l'acide perchlorique ?

2. L'acide perchlorique est-il fort ou faible ? Justifier la réponse.

13 L'acide des fourmis



L'acide formique ou méthanoïque a pour formule HCO_2H. C'est un acide faible. On le trouve dans le dard de plusieurs insectes comme les abeilles et les fourmis, mais aussi sur les poils de certaines plantes urticantes comme les orties.

1. a. Quelle est la base conjuguée de l'acide méthanoïque ?
b. Rappeler ce qu'est un acide faible.

2. Écrire l'équation chimique de la réaction modélisant la transformation entre l'acide méthanoïque et l'eau.

3. Comment nomme-t-on la constante de cet équilibre chimique ? Donner son expression.

14 Réactions avec l'eau

Les réactions d'équations chimiques suivantes modélisent la transformation d'une espèce chimique avec l'eau :

A $NH_3\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftarrows NH_4^+\,(aq) + HO^-\,(aq)$

B $CN^-\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightarrow HCN\,(aq) + HO^-\,(aq)$

C $CH_3CO_2^-\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftarrows CH_3CO_2H\,(aq) + HO^-\,(aq)$

1. Ces espèces chimiques réagissant avec l'eau sont-elles des acides ou des bases ? Justifier chaque réponse.

2. Préciser le caractère faible ou fort de chacune de ces espèces en justifiant.

2 Solution d'acide ou de base

EN AUTONOME

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Prévoir la composition finale d'une solution aqueuse de concentration donnée en acide fort ou faible apporté.
- Citer des solutions aqueuses d'acides et de bases courantes et les formules des espèces dissoutes associées : acide chlorhydrique, acide nitrique, acide éthanoïque, soude et ammoniac.
- Comparer la force de différents acides ou de différentes bases dans l'eau.

Acquérir les bases : 15 S'entraîner : 25 35

15 Solution d'acide nitrique

L'acide nitrique HNO_3 (ℓ) est un acide fort qui réagit avec l'eau selon l'équation :

$$HNO_3\,(\ell) + H_2O\,(\ell) \rightarrow NO_3^-\,(aq) + H_3O^+\,(aq)$$

On considère une solution aqueuse d'acide nitrique de concentration en quantité de matière apportée : $c = 5{,}0 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1}.

1. Une solution aqueuse d'acide nitrique contient-elle des molécules d'acide nitrique HNO_3 ? Justifier la réponse.

2. Quelle est la valeur des concentrations effectives $[NO_3^-(aq)]_f$ et $[H_3O^+(aq)]_f$?

3. Quel est la valeur du pH de cette solution ?

16 Un acide fort courant

On dissout $8{,}3 \times 10^{-2}$ mol de chlorure d'hydrogène HCl gazeux dans de l'eau afin d'obtenir un volume $V = 5{,}0$ l de solution d'acide fort de concentration c.

1. Écrire l'équation de la réaction qui modélise la transformation du chlorure d'hydrogène avec l'eau.

2. Comment appelle-t-on la solution obtenue ?

3. Calculer la concentration c.

4. Calculer les concentrations effectives $[HCl(g)]_f$, $[H_3O^+(aq)]_f$ et $[Cl^-(aq)]_f$.

5. Quelle est la valeur du pH de la solution obtenue ?

17 De la soude pour déboucher une canalisation

L'hydroxyde de sodium ou soude est une base forte.

Pour déboucher une canalisation, on utilise de la soude ($Na^+(aq)$, $HO^-(aq)$) à la concentration en quantité de matière $c = 3{,}0 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.

1. Justifier que cette solution soit notée ($Na^+(aq)$, $HO^-(aq)$).

2. Calculer les concentrations en quantité de matière effectives $[HO^-(aq)]_f$ et $[Na^+(aq)]_f$.

18 Comparer la force des acides

On mesure le pH de quatre solutions d'acides différents mais de même concentration en quantité de matière $c = 1{,}0 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.

Acide fluorhydrique HF	pH = 2,7
Acide hypochloreux HClO	pH = 5,0
Acide sulfamique H_2NSO_3H	pH = 2,0
Acide chloreux $HClO_2$	pH = 2,2

1. Un acide fort se trouve-il parmi ces quatre espèces chimiques ? Si oui, lequel ? Justifier la réponse.

2. Classer ces acides selon l'ordre croissant de leur force. Justifier ce classement.

3. Les valeurs des pK_A des couples auxquels appartiennent l'acide fluorhydrique, l'acide hypochloreux et l'acide chloreux sont respectivement 3,2 ; 7,5 et 1,9.
Comment varie la force d'un acide en fonction du pK_A du couple auquel il appartient ?

19 L'ammoniac

Pour obtenir une solution d'ammoniac utilisée comme produit nettoyant et détachant, on dissout dans un volume $V = 250$ mL d'eau une quantité de matière d'ammoniac $n = 2{,}5 \times 10^{-3}$ mol. Le pH de la solution obtenue vaut 10,6.

1. Calculer la concentration c en ammoniac apporté.

2. Calculer la concentration en quantité de matière d'ions hydroxyde $[HO^-(aq)]_f$ dans la solution.

3. Montrer que le taux d'avancement final τ peut s'écrire $\tau = \dfrac{[HO^-]_f}{c}$, puis calculer sa valeur.

4. En déduire si l'ammoniac est une base forte ou faible.

20 La vitamine C

La vitamine C ou acide ascorbique est un acide faible.
Une solution aqueuse de vitamine C, de concentration en quantité de matière $c = 2{,}5 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1} et de volume $V = 200$ mL, a un pH de 2,8.



1. Écrire l'équation de la réaction se produisant entre l'acide ascorbique, noté AH, et l'eau et établir un tableau d'avancement.

2. Déduire de la valeur du pH la valeur de l'avancement final x_f.

3. Calculer les concentrations en quantité de matière effectives de l'acide ascorbique $[AH(aq)]_f$ et de sa base conjuguée $[A^-(aq)]_f$.

3 Diagramme d'un couple

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Diagrammes de prédominance et de distribution d'un couple acide-base ; espèce prédominante, cas des indicateurs colorés et des acides alpha-aminés

- Représenter le diagramme de prédominance d'un couple acide-base.
- Exploiter un diagramme de prédominance ou de distribution.
- Justifier le choix d'un indicateur coloré lors d'un titrage.

➥ Acquérir les bases : 21 ➥ S'entraîner : 27 28 30

Solution tampon

- Citer les propriétés d'une solution tampon.

➥ Acquérir les bases : 22 ➥ S'entraîner : 34

21 L'aspirine

L'aspirine ou acide acétylsalicylique est l'acide d'un couple que l'on notera $AH(aq) / A^-(aq)$ de $pK_A = 3{,}5$.

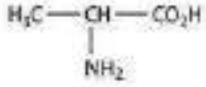


1. Représenter le diagramme de prédominance du couple de l'aspirine.

2. Quelle forme de l'aspirine prédomine dans un verre d'eau de pH égal à 7,0 ? et dans l'estomac (pH = 1,5) ?

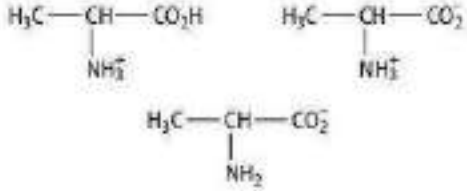
22 Un acide alpha-aminé

L'alanine est un acide alpha-aminé dont la formule est :



1. Recopier la formule de cet acide alpha-aminé, puis entourer les groupes caractéristiques en les nommant et en indiquant s'ils ont des propriétés acides ou basiques en solution.

2. En solution, l'alanine peut donner trois formes selon le pH :



Constituer les deux couples acide-base auxquels appartiennent ces espèces.

3. Les pK_A associés à ces deux couples ont pour valeurs $pK_{A1} = 2,3$ et $pK_{A2} = 9,9$. Attribuer ces valeurs aux deux couples constitués précédemment.

4. Tracer le diagramme de prédominance de l'alanine.

5. Quelle forme de l'alanine prédomine dans une solution de pH = 11,2 ?

23 Solutions tampons GOOD

Les tampons Good sont des solutions tampons utilisées en physiologie. Ils comprennent une vingtaine de produits synthétisés particulièrement appropriés aux applications biologiques, présentant par exemple une certaine résistance aux dilutions. Leur pK_A s'étend de 6 à 8.

Donnée :
Le pH du sang a une valeur autour de 7,4.

1. Quelle est la propriété des solutions tampon citée dans le texte ?

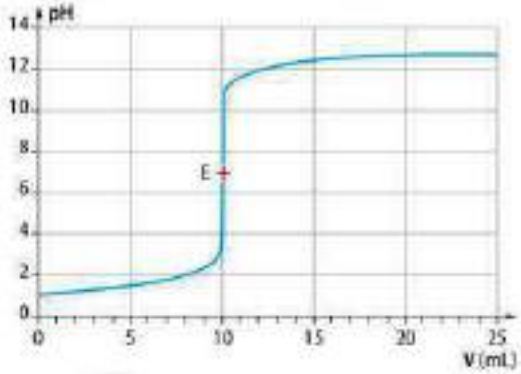
2. Énoncer les autres propriétés des solutions tampons.

3. Justifier l'intérêt d'une gamme de pK_A allant de 6 à 8 pour des applications biologiques.

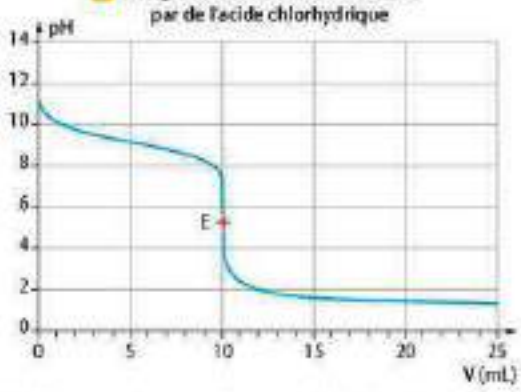
24 Choix d'un indicateur coloré pour un titrage

On considère les deux titrages suivants.

A Titrage de l'acide chlorhydrique par la soude



C Titrage d'une solution d'ammoniac par de l'acide chlorhydrique



1. Choisir pour chaque titrage, en justifiant, un indicateur coloré adapté parmi ceux donnés dans le tableau (Fig. 5, page 170.

2. Préciser le changement de teinte à l'équivalence dans chacun des cas.

Faire le point avant d'aller plus loin

PRÉPA BAC

Pour vérifier ses connaissances, répondre aux questions suivantes (sans regarder le cours !)

- Définir un acide faible, une base faible, un acide fort, une base forte.
- Écrire l'équation de l'équilibre dont K_e est la constante.
- Tracer le diagramme de prédominance d'un couple acide-base.
- Citer les propriétés d'une solution tampon.
- Écrire l'équation de l'équilibre dont la constante d'acidité K_A est la constante.
- Citer des solutions aqueuses d'acides et de bases courantes, et les formules des espèces dissoutes.
- Expliquer comment choisir un indicateur coloré lors d'un titrage acide-base.
- Expliquer comment on peut prévoir la composition d'une solution d'acide fort, puis d'acide faible.

Retrouver ces questions en version numérique — Flash PAGE cartes mémos

Exercice résolu — EN AUTONOMIE

25 Composition d'une solution d'acide glycolique



L'acide glycolique est un acide faible de formule brute $C_2H_4O_3$. Il est très présent dans les produits cosmétiques car il améliore la texture et l'apparence de la peau.

On considère un volume V d'une solution d'acide glycolique de concentration en quantité de matière $c = 1{,}0 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1} à la température de 25 °C.

Données : $C_2H_4O_3$ (aq) / $C_2H_3O_3^-$ (aq) ; $pK_A = 3{,}8$ à 25 °C.

1. **Exprimer** les concentrations effectives d'acide glycolique $[C_2H_4O_3\,(aq)]$ et de sa base conjuguée $[C_2H_3O_3^-\,(aq)]$ en fonction du taux d'avancement final τ de la transformation entre l'acide glycolique et l'eau.
2. **Établir** l'équation à laquelle obéit le taux d'avancement final τ de la transformation.
3. **Résoudre cette équation** pour déterminer le taux d'avancement final τ.
4. **Calculer** les concentrations effectives d'acide glycolique $[C_2H_4O_3\,(aq)]$ et de sa base conjuguée $[C_2H_3O_3^-\,(aq)]$.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- Un **acide faible** ne réagit pas totalement avec l'eau.
- Le **pK_A** d'un couple acide-base relie les concentrations en acide et base conjuguée.

LES VERBES D'ACTION

- **Exprimer :** donner la relation littérale d'une grandeur en fonction d'autres grandeurs.
- **Établir :** mettre en œuvre un raisonnement pour trouver un résultat.
- **Résoudre une équation :** trouver la valeur de la (ou des) solution(s) en suivant la méthode adaptée au type d'équation.
- **Calculer :** trouver la valeur d'une grandeur en effectuant des opérations mathématiques.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. $C_2H_4O_3\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftarrows C_2H_3O_3^-\,(aq) + H_3O^+\,(aq)$

L'avancement maximal est $x_{max} = c \cdot V$, donc $c = \dfrac{x_{max}}{V}$.

Le taux d'avancement final est $\tau = \dfrac{x_f}{x_{max}}$, donc $x_f = x_{max} \cdot \tau$.

- $[C_2H_3O_3^-\,(aq)]_f = \dfrac{x_f}{V} = \dfrac{x_{max} \cdot \tau}{V} = \boldsymbol{c \cdot \tau}$
- $[C_2H_4O_3\,(aq)]_f = \dfrac{c \cdot V - x_f}{V} = \dfrac{x_{max} - x_{max} \cdot \tau}{V} = \dfrac{x_{max} \cdot (1-\tau)}{V} = \boldsymbol{c \cdot (1-\tau)}$

2. La constante d'acidité K_A du couple s'écrit : $K_A = \dfrac{(c \cdot \tau)^2}{c \cdot (1-\tau)}$, on en déduit l'équation du second degré : $\boldsymbol{c \cdot \tau^2 + K_A \cdot \tau - K_A = 0}$.

3. On calcule :
- la valeur de $K_A = 10^{-pK_A} = 10^{-3{,}8} = 1{,}58 \times 10^{-4}$;
- le discriminant $\Delta = K_A^2 + 4c \cdot K_A = (1{,}58 \times 10^{-4})^2 + 4 \times 1{,}0 \times 10^{-3} \times 1{,}58 \times 10^{-4}$,

$\Delta = 6{,}6 \times 10^{-6}$, d'où la seule solution positive $\tau = \dfrac{-K_A + \sqrt{\Delta}}{2c} = 0{,}33$ soit $\tau = 33\,\%$.

4. • $\boldsymbol{[C_2H_3O_3^-\,(aq)]_f = c \cdot \tau = 1{,}0 \times 10^{-3} \times 0{,}33 = 3{,}3 \times 10^{-4}\ mol \cdot L^{-1}}$
• $\boldsymbol{[C_2H_4O_3\,(aq)]_f = c \cdot (1-\tau) = 1{,}0 \times 10^{-3} \times (1 - 0{,}33) = 6{,}7 \times 10^{-4}\ mol \cdot L^{-1}}$

QUELQUES CONSEILS

1. Écrire l'équation et exprimer l'avancement maximal et l'avancement final. On pourra s'aider d'un tableau d'avancement.
2. Exprimer la constante d'acidité K_A en fonction du taux d'avancement final τ.

EXERCICE SIMILAIRE

26 Composition d'une solution d'acide benzoïque

L'acide benzoïque est un acide faible de formule brute $C_7H_6O_2$. C'est un conservateur alimentaire parfois utilisé comme additif sous le code E210.

On considère une solution d'acide benzoïque de volume V et de concentration en quantité de matière $2{,}0 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1} à la température de 25 °C.

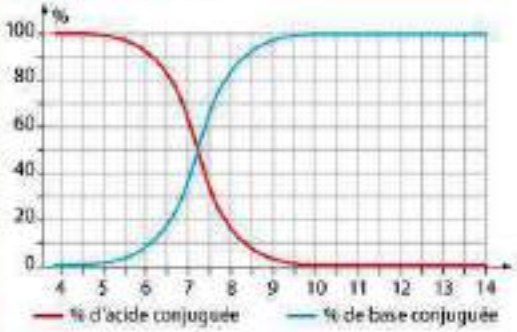
Données : $C_7H_6O_2$ (aq) / $C_7H_5O_2^-$ (aq) ; $pK_A = 4{,}2$ à 25 °C.

1. Exprimer les concentrations effectives d'acide benzoïque $[C_7H_6O_2\,(aq)]_f$ et de sa base conjuguée $[C_7H_5O_2^-\,(aq)]_f$ en fonction du taux d'avancement final τ de la transformation entre l'acide benzoïque et l'eau.
2. Établir l'équation à laquelle obéit le taux d'avancement final τ de la transformation.
3. Résoudre cette équation pour déterminer le taux d'avancement final τ.
4. Calculer les concentrations effectives d'acide benzoïque $[C_7H_6O_2\,(aq)]_f$ et de sa base conjuguée $[C_7H_5O_2^-\,(aq)]_f$.



Exercice résolu EN AUTONOMIE

27 L'eau de Javel



L'eau de Javel est une solution aqueuse fréquemment utilisée comme désinfectant ou comme décolorant. L'espèce active contenue dans l'eau de Javel est l'ion hypochlorite ClO^- (aq), c'est une base faible. Le diagramme de distribution du couple HClO (aq) / ClO^- (aq) est donné ci-contre.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- Une **base faible** ne réagit pas totalement avec l'eau.
- Le **diagramme de distribution** permet d'évaluer la proportion d'acide et de base conjuguée dans une solution de pH donné.

LES VERBES D'ACTION

- Déterminer : mettre en œuvre une stratégie pour trouver un résultat.
- En déduire : intégrer les résultats précédents pour répondre.

1. Déterminer la valeur du pK_A du couple HClO (aq) / ClO^- (aq).

2. a. Déterminer le pourcentage de chaque espèce conjuguée dans une solution d'eau de Javel de pH = 8,5 et de concentration en quantité de matière $c = 6{,}0 \times 10^{-5}$ mol · L^{-1}.

b. En déduire la concentration en quantité de matière de chaque espèce conjuguée dans cette solution.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. $HClO\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightleftarrows ClO^-\,(aq) + H_3O^+\,(aq)$

La constante d'acidité s'écrit :

$$K_A = \frac{[ClO^-\,(aq)]_f \cdot [H_3O^+\,(aq)]_f}{[HClO\,(aq)]_f}$$

Lorsque $[HClO\,(aq)]_f = [ClO^-\,(aq)]_f$, $K_A = [H_3O^+\,(aq)]_f$, donc $pK_A = pH$.

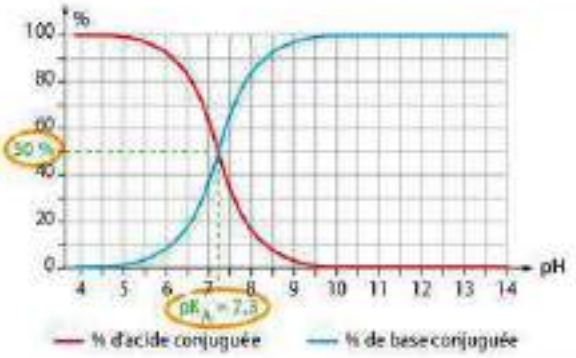
On lit graphiquement $\mathbf{pK_A = 7{,}3}$.

2. a. Par lecture graphique, le pourcentage de HClO vaut **8 %** et celui de ClO^- **92 %**.

b. La concentration effective de chaque espèce conjuguée s'obtient en multipliant la concentration c par le pourcentage de chaque espèce.

D'où :

- $\mathbf{[HClO\,(aq)]_f = 0{,}08 \times 6{,}0 \times 10^{-5} = 4{,}8 \times 10^{-6}\ mol \cdot L^{-1}}$
- $\mathbf{[ClO^-\,(aq)]_f = 0{,}92 \times 6{,}0 \times 10^{-5} = 5{,}5 \times 10^{-5}\ mol \cdot L^{-1}}$



QUELQUES CONSEILS

1. Écrire l'expression de K_A lorsque acide et base conjuguée sont en proportions égales.
2. Exploiter le diagramme de distribution ; les proportions d'acide et de base conjuguée ne dépendent que du pH.

EXERCICE SIMILAIRE

28 L'acide caprique

L'acide caprique est un acide carboxylique de formule brute $C_{10}H_{20}O_2$ présent en petite quantité dans le lait de chèvre. Il est en revanche abondant dans les huiles tropicales comme l'huile de noix de coco et l'huile de palmiste. L'acide caprique est, entre autres, responsable des bienfaits pour la santé attribués à l'huile de coco. Le diagramme de distribution du couple $C_{10}H_{20}O_2$ (aq) / $C_{10}H_{19}O_2^-$ (aq) est donné ci-contre.



1. Déterminer la valeur du pK_A du couple auquel appartient l'acide caprique.

2. a. Déterminer le pourcentage de chaque espèce conjuguée dans un lait de chèvre de pH = 6,0 et de concentration en quantité de matière d'acide caprique $c = 1{,}52 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.

b. En déduire la concentration en quantité de matière de chaque espèce conjuguée dans cette solution.

S'entraîner pour maîtriser

SAVOIR RÉDIGER

29 Proposer une correction de la solution donnée par un élève.

Énoncé

L'acide lactique qu'on notera AH est un acide carboxylique qui, contrairement à ce que son nom pourrait laisser penser, n'est pas uniquement présent dans le lait mais aussi dans des fruits et légumes.
On considère une solution aqueuse d'acide lactique de concentration en quantité de matière $c = 1{,}0 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1} et de volume V. Le taux d'avancement final de la transformation chimique entre l'acide lactique et l'eau est $\tau = 13\,\%$.

1. Déterminer la valeur du pH de cette solution.
2. Exprimer la constante d'acidité du couple auquel appartient l'acide lactique en fonction du taux d'avancement final τ.
3. Déterminer la valeur du pK_A du couple acide-base de l'acide lactique. Comparer à la valeur de référence égale à 3,8.

Solution proposée par un élève

1. $pH = -\log c = -\log(1{,}0 \times 10^{-2}) = 2{,}0$) Cette relation n'est pas valable dans le cas d'un acide faible.

2. Tableau d'avancement :

État	x	$AH\,(aq)$ +	$H_2O\,(\ell)$ →	$A^-\,(aq)$ +	$H_3O^+\,(aq)$
initial	0	$c \cdot V$	solvant	0	0
en cours	x	$c \cdot V - x$	solvant	x	x
final	$x_f = c \cdot V$	$c \cdot V - x_f$	solvant	x_f	x_f

) La transformation d'un acide faible avec l'eau n'est pas totale.

L'avancement maximal est $x_{max} = c \cdot V$, donc $c = \dfrac{x_{max}}{V}$.
Le taux d'avancement final est $\tau = \dfrac{x_f}{x_{max}}$,
donc $x_f = x_{max} \cdot \tau$.

$$[A^-(aq)]_f = [H_3O^+(aq)]_f = \frac{x_f}{V} = \frac{x_{max} \cdot \tau}{V} = c \cdot \tau$$

$$[AH(aq)]_f = \frac{c \cdot V - x_f}{V} = \frac{x_{max} - x_{max} \cdot \tau}{V} = \frac{x_{max} \cdot (1-\tau)}{V} = c \cdot (1-\tau)$$

La constante d'acidité K_A du couple s'écrit donc :

$$K_A = \frac{(c \cdot \tau)^2}{c \cdot (1-\tau)}$$

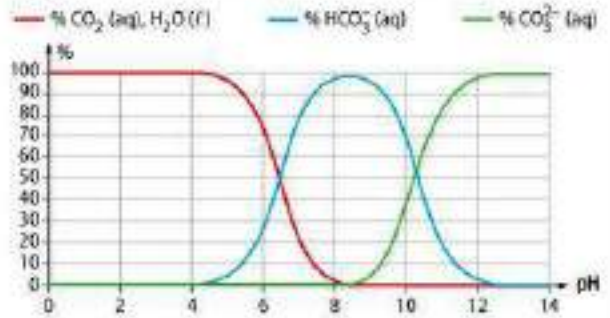
3. $K_A = \dfrac{(1{,}0 \times 10^{-2} \times 0{,}13)^2}{1{,}0 \times 10^{-2} \times (1 - 0{,}13)} = 1{,}9 \times 10^{-4}$

d'où $pK_A = -\log(1{,}9 \times 10^{-4}) = 3{,}7$, valeur proche de la valeur de référence.

30 Le pH de l'eau distillée

1. a. Écrire l'équation d'autoprotolyse de l'eau et l'expression du produit ionique K_e associé.
b. À 25 °C, $[HO^-\,(aq)]_f = 1{,}0 \times 10^{-7}$ mol · L^{-1}. Calculer la valeur du pH de l'eau distillée pure.

2. De l'eau fraîchement distillée et laissée quelque temps à l'air libre dans un bécher, à 25 °C, voit du dioxyde de carbone présent dans l'air s'y dissoudre progressivement et son pH diminuer progressivement jusqu'à la valeur 5,7.
On donne les couples acide-bases suivants :
$CO_2\,(aq), H_2O\,(\ell)$ / $HCO_3^-\,(aq)$ et $HCO_3^-\,(aq)$ / $CO_3^{2-}\,(aq)$ et le diagramme de distribution correspondant :



a. Écrire l'équation de la réaction entre le dioxyde de carbone dissout et l'eau.
b. Justifier que l'on puisse négliger la réaction entre les ions carbonate $CO_3^{2-}\,(aq)$ et l'eau dans de l'eau distillée.
c. Expliquer pourquoi le pH de l'eau distillée laissée à l'air libre a tendance à diminuer.

JE VÉRIFIE QUE J'AI...
- repéré le dioxyde de carbone dissous dans un couple acide-base ;
- bien lu sur le graphique le pourcentage d'ions carbonate CO_3^{2-} au pH considéré.

31 Il est frais mon poisson !

Lorsque le poisson n'est plus frais, sa décomposition progressive conduit à la formation d'espèces chimiques malodorantes, comme la triméthylamine $(CH_3)_3N$. Une solution de cette espèce chimique a un pH de 11,5.

Donnée : *le pK_A du couple de la triméthylamine vaut 9,8.*

1. Cette amine a-t-elle des propriétés acides ou basiques en solution ?
2. Écrire la formule de l'espèce conjuguée, puis le couple acide-base correspondant.
3. En déduire l'équation de la réaction de la triméthylamine avec l'eau.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

4. Quelle espèce conjuguée prédomine dans cette solution ? Justifier la réponse.

5. Déterminer le quotient de la concentration de la forme basique par celle de la forme acide, à partir du pK_A du couple et du pH de la solution.

32 Caustic potash

Potassium hydroxide is a compound with the formula KOH, and is commonly known as caustic potash.

In the past, it was made by leaching wood ashes and then evaporating the resulting solution in large iron pots, leaving a white residue called "pot ash".

Along with sodium hydroxide NaOH, this colourless solid is a prototypical strong base. It has many industrial applications.



1. What is the main property of caustic potash?

2. Define a strong base.

3. The concentration of a potassium hydroxide solution is $2{,}0 \times 10^{-2}$ mol / L^{-1}.

Determine the pH of this solution.

33 La composition d'un détartrant

DÉMARCHES DIFFÉRENCIÉES

Un détartrant est une solution d'acide éthanoïque de concentration en quantité de matière $c = 8{,}0 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.

Données : CH_3CO_2H *(aq)* / $CH_3CO_2^-$ *(aq)* : $pK_A = 4{,}8$.

DÉMARCHE EXPERTE

Déterminer les concentrations en quantité de matière effectives de l'acide éthanoïque et de sa base conjuguée et la valeur de son pH.

DÉMARCHE AVANCÉE

1. a. Exprimer les concentrations effectives de l'acide éthanoïque, de sa base conjuguée et des ions oxoniums en fonction de la concentration en quantité de matière c et du taux d'avancement final τ de la transformation entre l'acide et l'eau.

b. Montrer que le taux d'avancement final τ obéit à l'équation suivante :

$$c \cdot \tau^2 + K_A \cdot \tau - K_A = 0$$

2. a. Calculer les concentrations en quantité de matière effectives de l'acide éthanoïque, de sa base conjuguée et des ions oxoniums.

b. Calculer la valeur du pH de cette solution et la comparer à la valeur mesurée pH = 3,0.

34 Acide et base conjuguée

Un litre de solution aqueuse contient 0,20 mol d'acide éthanoïque et 0,20 mol d'éthanoate de sodium. Le pH de cette solution est égal à 4,8.

Données :

• *Masses molaires atomiques :* $M_{Na} = 23{,}0\ g \cdot mol^{-1}$, $M_O = 16{,}0\ g \cdot mol^{-1}$, $M_H = 1{,}0\ g \cdot mol^{-1}$.

1. Déterminer la valeur du pK_A du couple CH_3CO_2H (aq) / $CH_3CO_2^-$ (aq).

2. Cette solution constitue une solution tampon. Citer ses propriétés.

JE VÉRIFIE QUE J'AI...

- exprimé le pK_A en fonction du pH pour les valeurs de concentrations données.

3. Pour illustrer l'une de ces propriétés, on dissout dans cette solution 0,40 g de soude. Son pH prend alors la valeur 4,9. Que voudrait le pH si l'on dissolvait la même masse de soude dans un litre d'eau pure de pH = 7,0 ? Commenter.

35 Le vert de bromocrésol

Le vert de bromocrésol est un indicateur coloré. C'est un couple acide-base de $pK_A = 4{,}9$ dont la forme acide notée HInd est jaune tandis que la forme basique notée Ind^- est bleue.

1. Écrire l'équation de la réaction entre l'espèce HInd (aq) et l'eau et exprimer la constante d'acidité du couple HInd (aq) / Ind^- (aq).

2. Établir la relation entre le pH et le pK_A.

3. On considère que le vert de bromocrésol prend sa teinte acide lorsque $\frac{[Ind^-]}{[HInd]} < 0{,}1$ et qu'il prend sa teinte basique lorsque $\frac{[Ind^-]}{[HInd]} > 10$. Déterminer sa zone de virage.

4. Tracer le diagramme de prédominance du vert de bromocrésol.

5. Peut-il être utilisé pour repérer l'équivalence d'un titrage acide-base dont le pH à l'équivalence est égal à 6,3 ? Justifier la réponse.

36 Diagramme de distribution

Le programme en langage Python suivant permet de tracer le diagramme de distribution d'un couple acide-base de pK_A donné.

```
1.  import matplotlib.pyplot as plt
2.  import scipy.optimize as spo
3.  import numpy as np
4.  pKA = float(input("pKA = "))
5.  def alpha(pH):
6.  return 100*(10**(-pH))/((10**(-pH))+10**(-pKA))
7.  def beta(pH):
8.  return 100*(10**(-pKA))/((10**(-pH))+10**(-pKA))
9.  pH=np.linspace(0,14,100)
10. plt.plot(pH,alpha(pH),"r",label="% de AH")
11. plt.plot(pH,beta(pH),"g",label="% de A-")
12. plt.xlabel("pH")
13. plt.ylabel("%")
14. plt.show()
```

1. Quel est l'objectif de la ligne 4 ?

2. Quelle est la grandeur tracée en abscisse ? Justifier la réponse.

3. a. À quelle grandeur chimique correspond *alpha(pH)* ? Justifier la réponse.
b. Préciser la couleur de la courbe correspondante. Justifier la réponse.
c. Démontrer que l'expression de cette grandeur est bien donnée par la relation de la ligne 6.

37 Un traitement à base d'acide fumarique

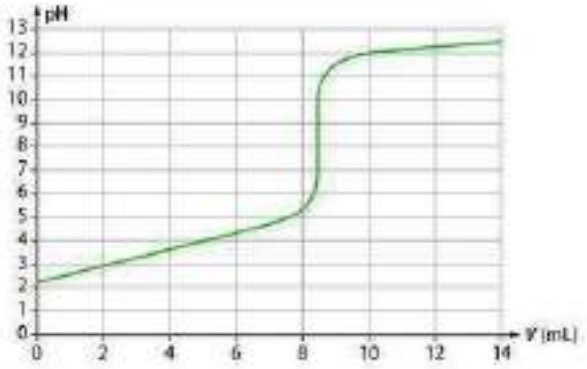
L'acide fumarique est un composé synthétisé normalement par la peau lorsque celle-ci est exposée au Soleil. Lorsque ce processus est déficient, l'être humain développe une maladie de la peau : le psoriasis.

On souhaite vérifier l'indication portée sur l'étiquette d'un traitement du psoriasis sous forme de gélules, à l'aide d'un titrage acide-base.

On prépare une solution de volume $V = 100{,}0$ mL contenant une gélule dissoute.

On dose un volume $V_A = 10{,}0$ mL de cette solution par de la soude de concentration en quantité de matière : $c_B = 1{,}0 \times 10^{-1}$ mol · L^{-1}.

La courbe d'évolution du pH en fonction du volume de soude versé est donnée ci-dessous.



L'équation de la réaction, support du titrage, est :
$AH_2\,(aq) + 2\,HO^-\,(aq) \rightarrow A^{2-}\,(aq) + 2\,H_2O\,(\ell)$

1. Parmi les trois indicateurs colorés suivants, lequel est le plus approprié pour effectuer le titrage de l'acide fumarique ? Justifier la réponse.

Indicateur coloré	Teinte acide	Zone de virage	Teinte basique
Hélianthine	Rouge	3,1 – 4,4	Jaune
Rouge de crésol	Jaune	7,2 – 8,8	Rouge
Jaune d'alizarine R	Jaune	10,1 – 12,1	Violet

2. a. Déterminer, en explicitant la démarche adoptée, la valeur expérimentale m_{exp} de la masse d'acide fumarique contenu dans une gélule ainsi que son incertitude-type $u_{m_{exp}}$.
L'incertitude-type relative $\frac{u_{m_{exp}}}{m_{exp}}$ dans les conditions de l'expérience, est donnée par la relation :

$$\frac{u_{m_{exp}}}{m_{exp}} = \sqrt{\left(\frac{u_{V_E}}{V_E}\right)^2 + \left(\frac{u_{V_A}}{V_A}\right)^2 + \left(\frac{u_{c_B}}{c_B}\right)^2}$$

On donne les incertitudes-type suivantes :
$u_{V_A} = 0{,}1$ mL ; $u_{V_E} = 0{,}1$ mL ; $u_{c_B} = 0{,}3 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.
b. Comparer la valeur déterminée expérimentalement à la valeur donnée par le fabricant $m_{fab} = 500$ mg en calculant le quotient $\frac{|m_{exp} - m_{fab}|}{u_{m_{exp}}}$. Conclure.

À L'ORAL

38 L'estomac du tamanoir



La digestion des aliments dans l'estomac nécessite un milieu acide de pH environ égal à 2.
Chez la plupart des mammifères, ce pH est atteint grâce à la production d'acide chlorhydrique dans l'organisme. En revanche, l'appareil digestif du tamanoir est différent en raison de son régime alimentaire : il mange jusqu'à 30 000 fourmis par jour ! Les glandes des fourmis contiennent de l'acide méthanoïque, le plus simple des acides carboxyliques aussi appelé acide formique.

Préparer un exposé oral permettant d'expliquer le fait que les tamanoirs n'ont pas besoin de produire d'acide chlorhydrique pour leur digestion.

Les mots-clés à utiliser

- **acide méthanoïque** • **acide fort** • **acide faible**
- **forme prédominante dans l'estomac du tamanoir**
- **pK_A du couple acide formique / ion formiate : 3,8**
- **concentration en acide formique apporté dans l'estomac du tamanoir**
- **concentration en acide chlorhydrique apporté dans l'estomac de la plupart des mammifères**

Ce court exposé devra pouvoir être réalisé sans note écrite.

39 RETOUR SUR LA PAGE D'OUVERTURE

La couleur de ces fleurs de la plante *Ipomoea tricolor Heavenly Blue* est due à un seul pigment connu sous l'abréviation HBA. Cette molécule qui possède des propriétés acido-basiques est rouge si le pH est inférieur à 6,6 et bleue si le pH est supérieur à 7,7.



Préparer un exposé oral expliquant le changement de couleur observé au cours de la floraison.

PRÉPA BAC

Développer ses compétences

40 Électrophorèse d'un mélange d'acides alpha-aminés TÂCHE COMPLEXE

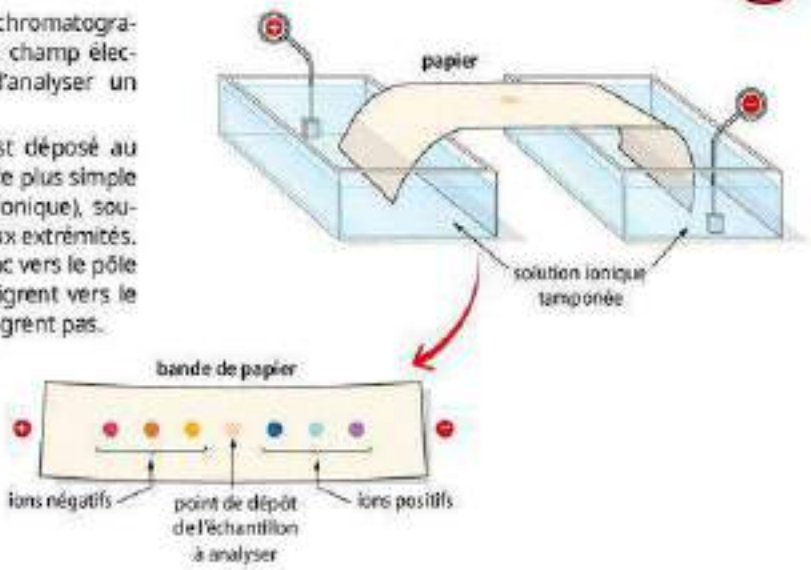
20 min

ANALYSER Proposer une stratégie de résolution

L'électrophorèse est une technique chromatographique qui s'effectue en présence d'un champ électrique. Elle permet de séparer et d'analyser un mélange d'acides alpha-aminés.

L'échantillon « mélange » à analyser est déposé au centre d'un support solide conducteur (le plus simple étant un papier imbibé d'une solution ionique), soumis à un champ électrique entre ses deux extrémités. Les ions de charge positive migrent donc vers le pôle négatif, les ions de charge négative migrent vers le pôle positif et les espèces neutres ne migrent pas.

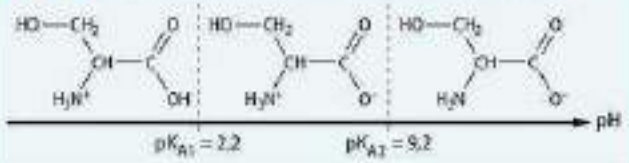
On désire séparer par électrophorèse un mélange aqueux tamponné de sérine et d'acide glutamique.



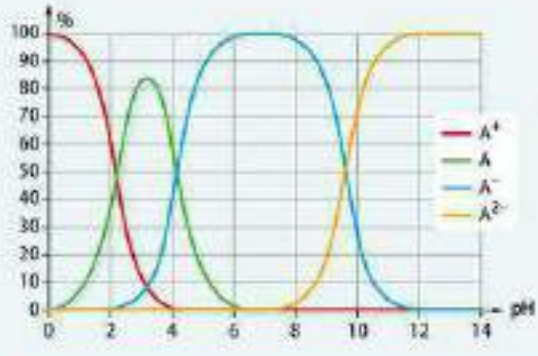
DOC 1 Solutions « tampon » disponibles

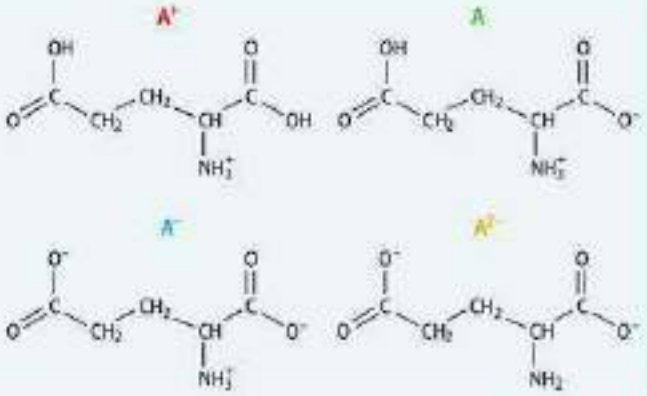


DOC 2 Diagramme de prédominance de la sérine



DOC 3 Diagramme de distribution de l'acide glutamique





LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

Déterminer quelle solution tampon choisir pour séparer par électrophorèse deux acides alpha-aminés : la sérine et l'acide glutamique.

Il est attendu une prise d'initiatives et une présentation de la démarche suivie même s'il elle n'a pas abouti, et de justifier toute réponse.

41 Contrôle de la qualité d'un lait

TÂCHE COMPLEXE — 30 min

RÉA Mettre en œuvre les étapes d'une démarche

L'industrie laitière met en œuvre divers contrôles de qualité du lait, avant de procéder à sa transformation (production de yaourts par exemple) ou à sa commercialisation.
La détermination de l'acidité Dornic permet d'évaluer l'état de fraîcheur d'un lait.



DOC 1 L'échelle d'acidité Dornic

Un lait frais est légèrement acide, son pH est compris entre 6,6 et 6,8. Cependant, le lactose qu'il contient subit naturellement une dégradation biochimique progressive sous l'effet de bactéries, et il se transforme en acide lactique $C_3H_6O_3$. En conséquence, plus le pH du lait est faible et moins il est frais.

L'industrie laitière utilise le degré Dornic pour quantifier l'acidité d'un lait. Cette unité doit son nom à Pierre Dornic (1864-1933), ingénieur agronome français.

1 °D correspond à 0,1 g d'acide lactique par litre de lait.

Pour être considéré comme frais, un lait doit avoir une acidité inférieure ou égale à 18 °D.

Entre 18 °D et 40 °D, le lait caille (il « tourne ») lorsqu'il est chauffé. Au-delà de 40 °D, il caille à température ambiante.

DOC 2 Des indicateurs colorés acido-basiques usuels

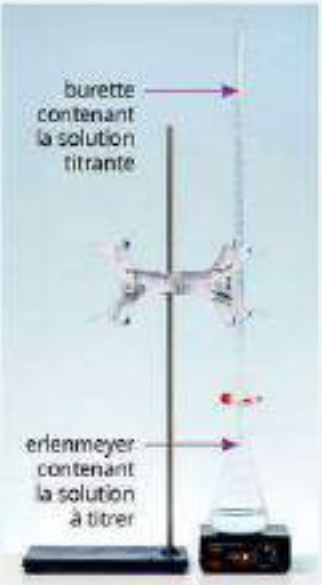
Indicateur coloré	Teinte de la forme acide	Zone de virage	Teinte de la forme basique
Hélianthine	rouge	3,1 < pH < 4,4	jaune
Bleu de bromothymol	jaune	6,0 < pH < 7,6	bleu
Rouge de phénol	jaune	6,6 < pH < 8,4	rouge

Un technicien dose l'acidité d'un lait selon la méthode Dornic : il réalise le titrage de 10,0 mL de lait par de la soude de concentration en quantité de matière $c_b = 0{,}111$ mol · L^{-1} dite soude Dornic.

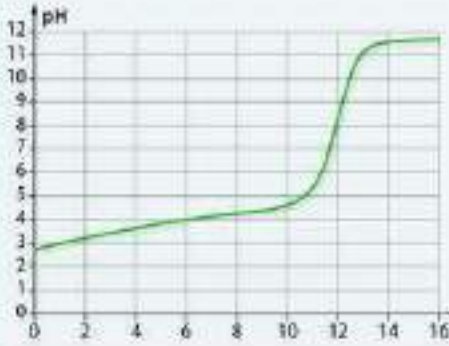
L'équivalence est repérée en ajoutant quelques gouttes de rouge de phénol, le volume de soude versée est alors de 2,1 mL. On admettra que l'acidité du lait est uniquement due à l'acide lactique.

Données :
- *Masses molaires atomiques : $M_H = 1{,}0$ g · mol^{-1}, $M_C = 12{,}0$ g · mol^{-1}, $M_O = 16{,}0$ g · mol^{-1}.*
- *pK_A du couple acide lactique/ion lactate : 3,9 à 25 °C.*

DOC 3 Courbe de titrage suivi par pH-métrie



20,0 mL de solution d'acide lactique de concentration en quantité de matière $3{,}00 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1} sont titrés par de la soude de concentration $5{,}00 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.



QUESTION PRÉLIMINAIRE

Des ions lactate sont-ils présents dans un lait quel que soit son état de fraîcheur ?

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

Déterminer si le lait dosé est frais. On justifiera le choix du rouge de phénol et l'intérêt pratique d'utiliser de la soude Dornic.

Il est attendu une prise d'initiatives et une présentation de la démarche suivie même s'il elle n'a pas abouti, et de justifier toute réponse.

42 Adaptation du pH de l'eau d'un aquarium

ANALYSE ET SYNTHÈSE DE DOCUMENTS

20 min

APP Rechercher et organiser l'information

Un aquarium et tout ce qu'il contient forment un système complexe à l'équilibre fragile.
Le pH de l'eau est une grandeur à mesurer régulièrement et à réguler si nécessaire.
Il ne doit pas varier de plus de 0,5 unité de pH.
Un aquariophile débutant n'arrive pas à réguler le pH de son aquarium qui contient des plantes et des poissons (scalaires, néons cardinal et guppys).
Le matin, le pH de l'eau est d'environ 6,7 et le soir de 7,5.

DOC 1 Injection de dioxyde de carbone

On peut injecter du dioxyde de carbone CO_2 dans un aquarium en utilisant un kit comprenant un bulleur, un détendeur et une bouteille pressurisée. En complément, une électrovanne programmable permet de choisir les horaires des périodes d'injection du dioxyde de carbone.

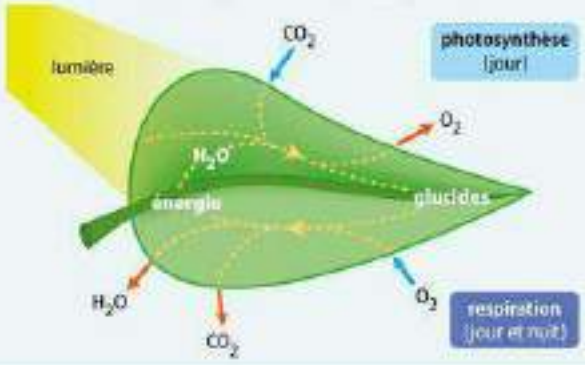
Données :

Couples acide-base	pK_A
CO_2 (aq), H_2O (ℓ) / HCO_3^- (aq)	6,3
HCO_3^- (aq) / CO_3^{2-} (aq)	10,3

DOC 2 Consommation et production de CO_2 et O_2

De jour comme de nuit, les poissons respirent, ils absorbent donc du dioxygène O_2 et rejettent du dioxyde de carbone CO_2.
En ce qui concerne les plantes, deux phénomènes sont à prendre en compte :
- de jour comme de nuit, elles respirent ;
- de jour, lorsqu'elles reçoivent de la lumière, les plantes réalisent la photosynthèse, modélisée par la réaction d'équation suivante :

$$6\,CO_2 + 6\,H_2O \xrightarrow{h\nu} C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2$$



ANALYSE

1. Écrire l'équation de la réaction modélisant la transformation entre le dioxyde de carbone dissout CO_2 (aq), H_2O (ℓ) et l'eau.

2. Quel est l'effet d'une injection de dioxyde de carbone sur la valeur du pH de l'eau de l'aquarium ?

3. Tracer le diagramme de prédominance des espèces acide-base liées au dioxyde de carbone dissout.
En déduire l'espèce prédominante le matin et le soir dans l'eau de l'aquarium.

SYNTHÈSE

Expliquer la variation du pH de l'eau observée en journée et proposer une méthode permettant de le réguler.

VERS LE SUP'

43 L'acide citrique dans le jus de citron

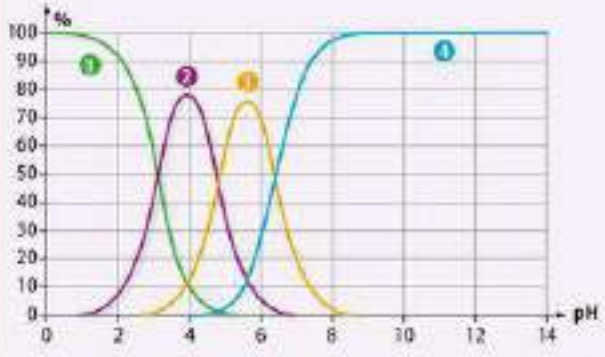
Le pH d'un jus de citron est de 2,5. On assimilera ce jus à une solution aqueuse d'acide citrique notée AH_3 (aq) de concentration en quantité de matière $c = 1{,}5 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.

1. Identifier les espèces chimiques correspondant à chacune des courbes du diagramme de distribution ci-contre.

2. Déterminer les valeurs des pK_A des couples de l'acide citrique.

3. a. Exprimer la concentration c en quantité de matière d'acide citrique apporté en fonction des concentrations effectives des espèces chimiques.
b. Quelles espèces peut-on négliger dans le jus de citron ? Justifier la réponse.
c. Que devient la relation trouvée en 3 a dans le cas du jus de citron ?

4. a. Déterminer la concentration en quantité de matière des espèces non négligées dans le jus de citron.
b. En déduire leur pourcentage relatif dans le jus de citron. Les comparer aux valeurs lues sur le diagramme de distribution.



Contrôle qualité d'un comprimé d'aspirine

Contexte



L'aspirine, ou acide acétylsalicylique possède des propriétés antalgiques, antipyrétiques et anti-inflammatoires. C'est la molécule active de nombreux médicaments.
Le but de cette épreuve est de vérifier la masse d'aspirine contenu dans un comprimé.

Documents mis à disposition

DOC 1 **Extrait de la notice de l'Aspirine du Rhône**

Aspirine 500 mg

Composition

Principes actifs : acide acétylsalicylique.... 500 mg pour un comprimé
Principes non actifs : amidon de maïs, poudre de cellulose granulée

Forme pharmaceutique

Comprimés

Classe pharmacothérapeutique

Antalgique périphérique, antipyrétique, anti-inflammatoire à dose élevée, antiagrégant plaquettaire

Mode et voie d'administration

Voie orale. Boire immédiatement après dispersion complète des comprimés dans un grand verre d'eau, de préférence au moment des repas.

Matériel mis à disposition

- Un ordinateur muni d'un logiciel permettant de simuler le tracé de la courbe pH-métrique du titrage d'une solution d'acide faible (de pK_A et concentration connus) par une base forte (de concentration connue).
- Un agitateur magnétique avec un barreau aimanté
- Béchers, pipettes jaugées, erlenmeyer, burette graduée
- Une solution S de volume $V = 250$ mL dans laquelle on a dissout un comprimé d'aspirine
- De la soude de concentration : $c_B = 1{,}00 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}
- Indicateurs colorés

DOC 2 **Données**

- Couple acide acétylsalicylique / ion acétylsalicylate : $C_9H_8O_4$ (aq) / $C_9H_7O_4^-$ (aq).
- $pK_A = 3{,}5$.
- Masses molaires atomiques : $M_H = 1{,}0$ g · mol^{-1}, $M_C = 12{,}0$ g · mol^{-1} , $M_O = 16{,}0$ g · mol^{-1}.

DOC 3 **Quelques indicateurs colorés**

Indicateur coloré	Teinte de la forme acide	Zone de virage	Teinte de la forme basique
Hélianthine	rouge	3,1 < pH < 4,4	jaune
Bleu de bromothymol	jaune	6,0 < pH < 7,6	bleu
Rouge de phénol	jaune	6,6 < pH < 8,4	rouge

Travail à effectuer

1. (ANA) **Proposition de protocole expérimental** *(25 min conseillées)*

■ À partir des documents et du matériel disponible, proposer un protocole expérimental d'un titrage colorimétrique permettant de déterminer la concentration en quantité de matière d'aspirine d'un échantillon $V_A = 10{,}0$ mL de la solution S. Justifier le choix de l'indicateur coloré.

Être en mesure de présenter le protocole

2. (RÉA) **Mise en œuvre du protocole expérimental proposé** *(15 min conseillées)*

■ Mettre en œuvre le protocole.

Être en mesure de présenter la valeur du volume équivalent

3. (VAL) **Exploitation du résultat obtenu** *(15 min conseillées)*

1. À partir du volume équivalent et de l'équation de réaction support du titrage, déterminer, en détaillant les différentes étapes du raisonnement, la masse m d'aspirine contenu dans un comprimé.
2. Comparer ce résultat à la valeur donnée par le fabricant et identifier les principales sources d'incertitude.

Défaire le montage et ranger la paillasse.

PISTE POUR LE GRAND ORAL PRÉPA BAC

Pour se préparer à l'Oral
➥ Livret LES CLÉS DU BAC
(en début de manuel)

UNE QUESTION

Comment l'augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique menace-t-elle les animaux marins ?

Enjeu de la question

Le dioxyde de carbone est le principal gaz à effet de serre qui contribue au réchauffement climatique, mais il est aussi responsable de l'acidification des océans qui met en péril des écosystèmes entiers.

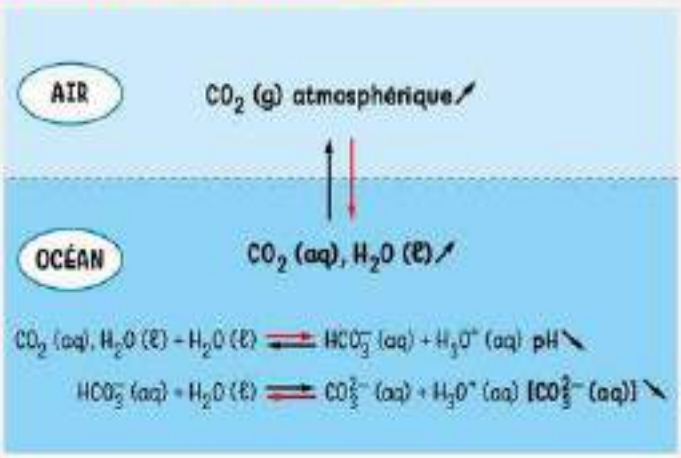
Proposition de plan de présentation

1. Origines des émissions de dioxyde de carbone
2. Équilibres chimiques acide-base liés au dioxyde de carbone
3. Diminution du pH et de la concentration en ions carbonates
4. Effets sur les coraux et les organismes à coquilles ou squelettes à base de carbonate de calcium

Les mots-clés

Combustion ▸ dissolution ▸ acide faible ▸ pH ▸ équilibre chimique ▸ diagramme de distribution

Exemple de support de présentation



Acidification des océans et conséquences

QUESTIONS D'APPROFONDISSEMENT POSSIBLES



UN EXEMPLE DE PROJET PROFESSIONNEL

L'ingénieure environnement a pour mission de mettre l'écologie au service d'un espace à sauvegarder. Elle mesure les conséquences des méthodes de production d'une entreprise sur l'air, l'eau et les sols et s'occupe de la gestion des déchets : elle est chargée de faire respecter les règlementations en vigueur.

Après le bac : *Bac + 5, diplôme d'ingénieur(e) spécialisé(e) ou master en sciences pour l'environnement, chimie durable et environnement...*

Autres métiers : *ingénieur(e) chimiste - technicien(ne) environnement - technicien(ne) chimiste.*

Ce métier exige de solides connaissances scientifiques, de travailler en équipe et d'être un bon communiquant.



Forcer le sens

Avant d'aborder le chapitre EN AUTONOMIE

LES ACQUIS INDISPENSABLES

■ Cycle 4 ■ 1re Enseignement de spécialité ■ Chapitre 6

■ Lorsque de l'énergie est échangée et garde la même forme, on parle de **transfert d'énergie**. Lorsque l'énergie passe d'une forme à une autre, on parle de **conversion d'énergie**.

■ Une **réaction d'oxydoréduction** est un transfert d'électrons entre l'oxydant et le réducteur de deux couples oxydant-réducteur différents.

Exemple :

$(Al\,(s) = Al^{3+}\,(aq) + 3\,e^-) \times 2$

$(Zn^{2+}\,(aq) + 2\,e^- = Zn\,(s)) \times 3$

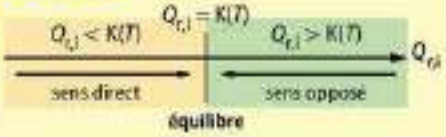
$2\,Al\,(s) + 3\,Zn^{2+}\,(aq) \rightarrow 2\,Al^{3+}\,(aq) + 3\,Zn\,(s)$

■ L'**intensité du courant électrique I**, exprimée en ampère, est définie par cette relation :

$$I = \frac{q}{\Delta t}$$

(I : intensité (en A) ; q : quantité de charge électrique (en C) ; Δt : durée (en s))

■ Le **quotient de réaction** à l'état initial $Q_{r,i}$ permet de connaître le sens d'évolution spontanée d'un système chimique, $K(T)$ étant la **constante d'équilibre** de la réaction.

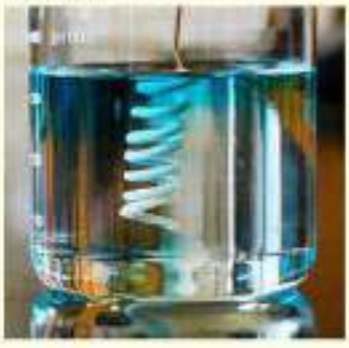


POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

Pour chaque situation, rédiger une réponse qui explique en quelques lignes le raisonnement.

SITUATION 1

Une réaction d'oxydoréduction se produit quand on plonge un fil de cuivre dans une solution de nitrate d'argent ($Ag^+\,(aq)$, $NO_3^-\,(aq)$).



Quelle est l'équation de la réaction modélisant cette transformation ?

Données :

• Couples oxydant-réducteur : $Ag^+\,(aq)$ / $Ag\,(s)$ et $Cu^{2+}\,(aq)$ / $Cu\,(s)$.

SITUATION 2

Après quelques heures d'utilisation, il est nécessaire de recharger son smartphone.

Quelle conversion d'énergie est mise en jeu lors de l'utilisation d'un smartphone ? lors de sa recharge ?

SITUATION 3

On considère la réaction suivante :

$Cu\,(s) + Br_2\,(aq) \leftrightarrows Cu^{2+}\,(aq) + 2\,Br^-\,(aq)$

La constante d'équilibre associée à cette réaction est $K(T) = 1{,}2 \times 10^{25}$.

On mélange les trois espèces chimiques en solution à des concentrations en quantité de matière initiales identiques $c_i = 0{,}010\ mol \cdot L^{-1}$.

Que vaut le quotient de réaction $Q_{r,i}$? Dans quel sens le système chimique va-t-il évoluer ?



CHAPITRE

8

CHIMIE

d'évolution d'un système



Quelles sont les alternatives proposées par cet aéronef dans le secteur du transport pour lutter contre les émissions de gaz à effet de serre ?

– EXERCICE 21

NOTIONS ET CONTENUS

- Passage forcé d'un courant pour réaliser une transformation chimique.
- Constitution et fonctionnement d'un électrolyseur.
- Stockage et conversion d'énergie chimique.

CAPACITÉS EXPÉRIMENTALES

- Identifier les produits formés lors du passage forcé d'un courant dans un électrolyseur. – Activité 1
- Relier la durée, l'intensité du courant et les quantités de matière de produits formés lors d'une électrolyse. – Activité 2

1. ACTIVITÉ DE DÉCOUVERTE

CLASSE INVERSÉE

COMPÉTENCES :
(ANA/RAI) Formuler des hypothèses.
(COM) Utiliser un vocabulaire adapté et choisir des modes de représentation appropriés.

Principe de l'électrolyse

Une transformation chimique fait évoluer spontanément un système, pris dans un état initial, vers un état final.
Comment peut-on contraindre un système chimique à fonctionner dans le sens inverse du sens spontané ?

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Expérience 1

- Verser dans un bécher 50 mL d'une solution de diiode I_2 (aq) de concentration en quantité de matière $[I_2\,(aq)] = 0{,}10\ mol \cdot L^{-1}$, puis y ajouter 0,50 g de copeaux de cuivre.
- Agiter le mélange réactionnel pendant quelques minutes.
- Observer et noter les changements de couleur.

Expérience 2

- Verser le mélange obtenu lors de l'expérience 1 dans un tube en U.
- Introduire une électrode de graphite dans chaque branche du tube.
- Relier ces électrodes à un générateur de tension continue égale à 6,0 V, branché pendant une dizaine de minutes.
- Observer et noter les changements de couleur au voisinage des électrodes et sur les électrodes.

DOC 1 Expérience 1

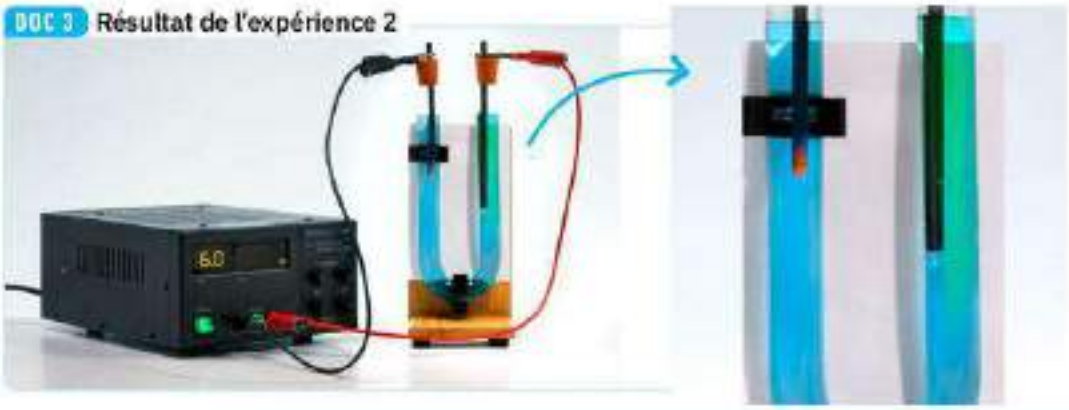


A État initial B État final

DOC 2 Données

- Couples oxydant-réducteur : I_2 (aq) / I^- (aq) ; Cu^{2+} (aq) / Cu (s).
- Couleurs des espèces chimiques en solution : jaune-orangé pour I_2 (aq), incolore pour I^- (aq), bleu ciel pour Cu^{2+} (aq).

DOC 3 Résultat de l'expérience 2



EXPLOITATION ET ANALYSE

1 a. Interpréter le changement de couleur du milieu réactionnel lors de l'expérience 1.

b. En déduire les deux demi-équations électroniques d'oxydoréduction et l'équation bilan de la réaction mise en jeu.

2 La constante d'équilibre associée à cette réaction chimique est $K(T) = 1{,}2 \times 10^{25}$.

a. Calculer le quotient de réaction $Q_{r,i}$ dans l'état initial.

b. Comment le système chimique évolue-t-il ?

3 a. Décrire pour l'expérience 2 en les justifiant les transformations se produisant au niveau de chaque électrode.

b. En déduire l'équation de la réaction. Conclure.

SYNTHÈSE

4 Expliquer comment inverser le sens d'une transformation chimique.

Je réussis si...

- **Je sais écrire une demi-équation d'oxydoréduction.**
- **Je sais calculer un quotient de réaction.**
- **Je connais le critère d'évolution spontanée d'un système chimique.**

2. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE

TP

COMPÉTENCES :
APP Rechercher et organiser l'information
RÉA Mettre en œuvre un protocole expérimental

Le dihydrogène, une solution d'avenir

Le dihydrogène devrait être utilisé plus largement à l'avenir dans les transports et la production d'électricité. Comment peut-on être autonome en énergie grâce au dihydrogène obtenu à partir d'énergies renouvelables ?

PARTIE 1 Production et utilisation du dihydrogène

DOC 1 Produire du dihydrogène H_2

L'hydrogène se trouve dans la nature combiné avec d'autres atomes : l'oxygène dans le cas de l'eau ou le carbone dans le cas du méthane. Pour le produire, il faut donc l'extraire. Pour cela, différents procédés existent.

- **Le vaporeformage** : c'est le procédé le plus utilisé actuellement et le moins cher. On projette de la vapeur d'eau à haute température sur du méthane CH_4, on obtient ainsi du dihydrogène et du dioxyde de carbone.
- **La gazéification du charbon** : porté à très haute température, le charbon se vaporise et le carbone qu'il contient réagit avec de la vapeur d'eau en produisant du dihydrogène et du dioxyde de carbone.
- **L'électrolyse de l'eau** : c'est un procédé qui permet de décomposer l'eau en dioxygène et dihydrogène gazeux sous l'action d'un courant électrique. Actuellement, c'est le procédé le plus coûteux. On utilise surtout l'énergie électrique produite par les centrales nucléaires ou thermiques pour réaliser cette électrolyse.

DOC 2 Un exemple de micro-réseau électrique



Un réseau électrique de petite taille, conçu pour fonctionner en autonomie a été installé dans le cirque de Mafate (accessible uniquement à pied ou en hélicoptère) afin d'approvisionner des consommateurs isolés du réseau électrique classique. Il est composé de panneaux photovoltaïques, d'accumulateurs lithium-ion, d'un système de stockage de dihydrogène et d'une pile à combustible. Des panneaux solaires captent l'énergie solaire pour la convertir en énergie électrique qui est soit stockée dans un accumulateur lithium-ion pour être consommée dans les jours à venir, soit transformée par électrolyse de l'eau en dihydrogène qui sera stocké. Pour injecter de l'électricité sur le micro-réseau en cas d'absence durable de Soleil ou en cas de pic de consommation, une pile à combustible assure la transformation inverse en produisant de l'électricité à partir du dihydrogène en ne rejetant que de l'eau. On peut ainsi être autonome en produisant et en stockant de l'énergie sans polluer.

DOC 2 Le dihydrogène dans les transports

Certains véhicules utilisent une pile à combustible consommant du dihydrogène (schéma). L'électricité ainsi produite alimente un moteur électrique. Cette technologie est peu polluante car les piles ne rejettent que de l'eau contrairement aux moteurs thermiques.



De nombreux pays et de grandes entreprises investissent dans cette nouvelle technologie pour lever certains freins tels que :

- le coût de fabrication élevé de ces véhicules ;
- le manque de stations-services proposant du dihydrogène ;
- la pollution engendrée par la production d'énergie nécessaire à la fabrication du dihydrogène : dioxyde de carbone pour les centrales thermiques et déchets radioactifs pour les centrales nucléaires. De nouvelles techniques utilisant les énergies renouvelables sont à l'étude pour produire un dihydrogène « plus propre ».

EXPLOITATION ET ANALYSE

1 Écrire l'équation de réaction associée à la transformation qui se produit :

a. lors du vaporeformage du méthane ;

b. lors de la gazéification du charbon.

2 Pourquoi la production de dihydrogène par électrolyse de l'eau est-elle très peu utilisée actuellement ?

3 Quelles conversions d'énergie sont réalisées dans les dispositifs du micro-réseau du cirque de Mafate ?

SYNTHÈSE

4 Quelles nouvelles perspectives envisager d'un point de vue énergétique avec l'utilisation du dihydrogène ? Quels seraient les avantages de ces nouvelles technologies ?

Je réussis si...

- **je connais les différentes conversions d'énergie.**

TP

PARTIE 2 Produire du dihydrogène par électrolyse et l'utiliser dans une pile à combustible

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Électrolyse de l'eau

- Remplir d'eau distillée l'électrolyseur et deux tubes gradués retournés sur les électrodes (on a utilisé ici un dispositif intégrant deux cylindres de stockage qui remplacent les tubes).
- Alimenter l'électrolyseur à l'aide d'une cellule photovoltaïque après avoir placé dans le circuit un ampèremètre branché en série.
- Relier les bornes d'un voltmètre aux deux électrodes.
- Stopper l'électrolyse après obtention de 10 mL de dihydrogène (tube le plus rempli).

Pile à combustible

- Relier une pile à combustible à un moteur électrique et un ampèremètre montés en série.
- Alimenter la pile à combustible à l'aide du dihydrogène et du dioxygène, récupérés après électrolyse, pour faire fonctionner le moteur électrique.



DOC 4 Données

$N_A = 6{,}02 \times 10^{23}\ mol^{-1}$. $e = 1{,}6 \times 10^{-19}\ C$.

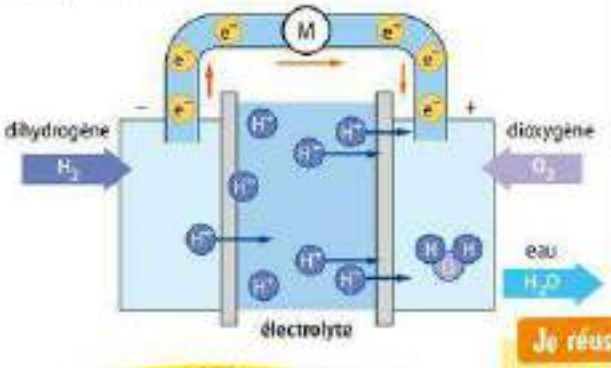
DOC 5 La pile à combustible

Découverte en 1839, la pile à combustible est basée sur la réaction d'oxydoréduction ayant lieu spontanément entre le dioxygène et le dihydrogène.

Le dihydrogène est le réducteur du couple H^+ (aq) / H_2 (g) et le dioxygène est l'oxydant du couple O_2 (g) / H_2O (ℓ).

La pile à combustible est constituée de deux compartiments disjoints alimentés respectivement en dioxygène et dihydrogène.

Les deux électrodes sont séparées par un électrolyte, solution qui laisse circuler les ions.



ANIMATION La pile à combustible

EXPÉRIENCE ET EXPLOITATION

1 a. Mettre en œuvre le protocole proposé.

b. Noter la durée de l'électrolyse et l'intensité du courant électrique.

2 a. Écrire l'équation de la réaction se déroulant dans l'électrolyseur.

b. Comparer les volumes de dihydrogène et de dioxygène formés. Ce résultat était-il prévisible ?

c. Que peut-on dire des réactions se produisant dans la pile et dans l'électrolyseur ?

3 a. Calculer la quantité de charges électriques q mise en jeu lors de l'électrolyse.

b. À quelle quantité d'électrons échangés cela correspond-il ?

c. Déterminer la quantité de matière de dihydrogène formé.

CONCLUSION

4 Décrire succinctement le fonctionnement de l'électrolyseur.

Je réussis si...

- **Je sais calculer une quantité de charges électriques q.**
- **Je sais déterminer une quantité de matière à partir de la quantité de charges électriques q.**
- **Je connais un dispositif mettant en jeu des conversions et stockages d'énergie chimique et les enjeux sociétaux associés.**

1 Transformations forcées

Évolution spontanée d'un système chimique

■ On souhaite observer l'**évolution d'un système chimique** composé des quatre espèces constituant les deux couples oxydant-réducteur I_2 (aq) / I^- (aq) et Zn^{2+} (aq) / Zn (s).

Pour cela, dans un bécher, on mélange le même volume $V = 20$ mL de trois solutions aqueuses de concentration en quantité de matière identique $c = 0{,}015$ mol · L^{-1} : une solution de diiode I_2 (aq), une solution d'iodure de potassium (K^+ (aq), I^- (aq)) et une solution de sulfate de zinc (Zn^{2+} (aq), SO_4^{2-} (aq)). On rajoute ensuite 20 mg de poudre de zinc dans le bécher (FIG. 1A).

■ La concentration initiale en quantité de matière de chaque espèce en solution est :

$$[Zn^{2+}\,(aq)]_i = [I_2\,(aq)]_i = [I^-\,(aq)]_i = \frac{n_i}{V_{total}} = \frac{c \cdot V}{V_{total}}$$

AN : $[Zn^{2+}\,(aq)]_i = [I_2\,(aq)]_i = [I^-\,(aq)]_i = \dfrac{0{,}015 \times 0{,}020}{0{,}060} = 0{,}0050$ mol · L^{-1}

Au bout de quelques minutes, la solution initialement jaune-orangée devient quasiment incolore et du zinc disparaît (FIG. 1B).

■ L'oxydation du zinc se traduit par la demi-équation :

$$Zn\,(s) = Zn^{2+}\,(aq) + 2\,e^-$$

Le diiode est réduit selon la demi-équation :

$$I_2\,(aq) + 2\,e^- = 2\,I^-\,(aq)$$

L'**équation de la réaction** s'écrit :

$$Zn\,(s) + I_2\,(aq) \rightleftarrows Zn^{2+}\,(aq) + 2\,I^-\,(aq)$$

■ À 25 °C, la **constante d'équilibre** qui lui est associée est : $K(T) = 10^{46}$.

■ Le **quotient de réaction** $Q_{r,i}$ dans l'état initial de ce système vaut :

$$Q_{r,i} = \frac{[Zn^{2+}\,(aq)]_i \cdot [I^-\,(aq)]_i^2}{[I_2\,(aq)]_i}$$

AN : $Q_{r,i} = \dfrac{0{,}0050 \times 0{,}0050^2}{0{,}0050} = 2{,}5 \times 10^{-5}$

Puisque $Q_{r,i} < K(T)$, le système va évoluer spontanément dans le sens direct de l'équation écrite ci-dessus jusqu'à atteindre un état d'équilibre.



A État initial



B État final

FIG. 1 Évolution spontanée du système chimique.

Évolution forcée

Un **générateur de tension continue** peut forcer un système chimique à évoluer dans le sens opposé à son sens d'évolution spontanée.

■ Le mélange précédent est versé dans un tube en U et on place une électrode de graphite à chaque ouverture. On relie ces électrodes à un générateur délivrant une tension continue de 6,0 V (FIG. 2).

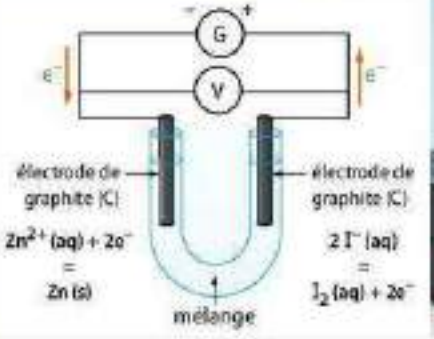




FIG. 2 Montage expérimental pour observer l'évolution forcée. ►

Après quelques minutes, on observe un dépôt métallique gris de zinc sur une des électrodes et la solution, au voisinage de l'autre électrode, prend une teinte jaune-orangée due au diiode formé (FIG. 3).

- Les électrons libérés par la borne négative du générateur sont captés par les ions zinc Zn^{2+} (aq) au niveau de l'électrode et se transforment en métal zinc Zn (s). Cette **réduction** est modélisée par la demi-équation :

$$Zn^{2+}(aq) + 2\,e^- = Zn(s)$$

- Les électrons qui entrent par la borne positive du générateur sont libérés au niveau de l'électrode par les ions iodure I^- (aq) pour se transformer en diiode I_2 (aq). Cette **oxydation** est modélisée par la demi-équation :

$$2\,I^-(aq) = I_2(aq) + 2\,e^-$$

- Le système chimique évolue dans le sens opposé à celui de la transformation spontanée rencontrée précédemment.

$$Zn^{2+}(aq) + 2\,I^-(aq) \rightleftharpoons Zn(s) + I_2(aq)$$



FIG. 3 État final obtenu lors de l'évolution forcée.

2 L'électrolyseur

Constitution et fonctionnement

- Un électrolyseur (FIG. 4) est constitué d'une cuve contenant deux électrodes.

Dans un **électrolyseur** relié à un générateur de tension continue se produit une transformation d'oxydoréduction forcée, appelée **électrolyse**, au cours de laquelle le système évolue dans le **sens opposé** à celui qui serait spontanément observé.

L'électrode où se produit l'**oxydation** est l'**anode**. Elle est reliée à la **borne positive du générateur** qui capte les électrons produits lors de l'oxydation d'une espèce chimique.

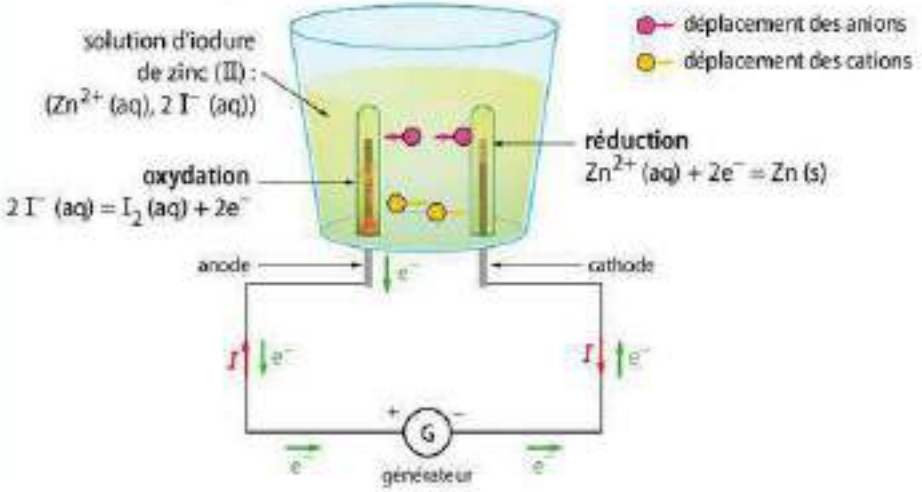
L'électrode où se produit la **réduction** est la **cathode**. Elle est reliée à la **borne négative du générateur** qui fournit les électrons nécessaires à la réduction.



FIG. 4 Électrolyseur en cours de fonctionnement.

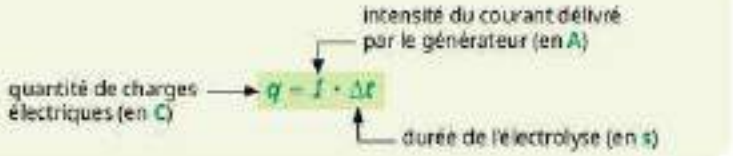
EXEMPLE

La transformation forcée étudiée au paragraphe 1 est mise en œuvre ci-dessous dans un électrolyseur.



Quantité de charges électriques mise en jeu

Lors d'une électrolyse de durée Δt réalisée à l'aide d'un générateur délivrant un courant d'intensité constante I, le système est traversé par une **quantité de charges électriques** q donnée par :



Cette quantité de charges électriques q est liée à la quantité de matière d'électrons échangés $n(e^-)$ lors de l'électrolyse.



REPÈRES

- La charge élémentaire est $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C.
- La constante d'Avogadro est $N_A = 6{,}02 \times 10^{23}$ mol^{-1}.

Variations de quantité de matière

En connaissant la quantité de matière d'électrons échangés lors de l'électrolyse, on peut suivre l'avancement de la réaction, donc suivre les variations de quantités de matière pendant la transformation forcée.

Pour l'électrolyse étudiée au paragraphe 1, en utilisant les deux demi-équations :

$$2\,I^-(aq) = I_2(aq) + 2\,e^-$$
$$Zn^{2+}(aq) + 2\,e^- = Zn(s)$$

on peut écrire :

- $n(I_2)_{formé} = \frac{1}{2} n(I^-)_{consommé} = \frac{1}{2} n(e^-) = \frac{I \cdot \Delta t}{2\,N_A \cdot e}$
- $n(Zn)_{formé} = n(Zn^{2+})_{consommé} = \frac{1}{2} n(e^-) = \frac{I \cdot \Delta t}{2\,N_A \cdot e}$

$n(e^-)$ étant la quantité d'électrons échangés au cours de l'électrolyse.

EXEMPLE

Un courant d'intensité $I = 500$ mA circule pendant une durée $\Delta t = 10$ min.

- $n(I_2)_{formé} = n(Zn)_{formé} = \frac{I \cdot \Delta t}{2\,N_A \cdot e} = \frac{0{,}500 \times 10 \times 60}{2 \times 6{,}02 \times 10^{23} \times 1{,}6 \times 10^{-19}}$

$n(I_2)_{formé} = n(Zn)_{formé} = 1{,}6 \times 10^{-3}$ mol

- $n(I^-)_{consommé} = 2 \times n(I_2)_{formé} = 3{,}2 \times 10^{-3}$ mol
- $n(Zn^{2+})_{consommé} = n(Zn)_{formé} = 1{,}6 \times 10^{-3}$ mol



3 Stockage et conversion d'énergie chimique

Le stockage de l'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie pour une utilisation future. Il est au cœur des enjeux actuels, qu'il s'agisse d'optimiser les ressources énergétiques ou d'en favoriser l'accès. Le stockage permet d'ajuster la production et la consommation d'énergie.

La diminution des réserves d'hydrocarbures, l'offre grandissante des appareils nomades, les problèmes liés à la pollution et au réchauffement climatique, poussent les chercheurs à développer des dispositifs dans lesquels s'effectue une conversion d'énergie chimique en énergie électrique.

Les piles

Une **pile** est un dispositif chimique qui convertit l'énergie chimique en énergie électrique grâce à une **réaction d'oxydoréduction spontanée**.

EXEMPLE

- Le type de pile qui présente le plus d'intérêt pour les chercheurs est la pile à combustible dans laquelle le dihydrogène H_2 (g) réagit avec le dioxygène O_2 (g) de l'air pour produire de l'électricité en ne rejetant que de l'eau. Cette pile ne produit pas de gaz à effet de serre lors de son fonctionnement.
- L'inconvénient de ce type de pile est le coût et la pollution engendrée par la production du dihydrogène. Cependant de nouvelles techniques utilisant les énergies renouvelables comme les panneaux solaires (FIG. 5) laissent à penser que l'on pourrait résoudre ce problème.



FIG. 5 Les panneaux solaires se trouvant sur le catamaran *Energy Observer* permettent de recharger les piles à combustible.

Les accumulateurs

Un **accumulateur** est une pile pouvant être rechargée grâce à une **électrolyse**.

Un accumulateur permet de transformer de l'énergie chimique en énergie électrique lors de son utilisation, puis l'inverse lors de sa recharge.

EXEMPLE

Les accumulateurs lithium-ion sont les plus utilisés de nos jours. Ils peuvent être de très petite taille dans un téléphone portable ou assemblés par dizaines dans une voiture électrique (FIG. 6).

L'autonomie et la réduction de la taille de ces accumulateurs ne cessent de s'améliorer.



FIG. 6 Voiture électrique fonctionnant avec des batteries lithium-ion.

Les organismes chlorophylliens

Lors de la **respiration**, le glucose $C_6H_{12}O_6$ que contient une plante subit en présence du dioxygène de l'air une **transformation chimique spontanée** modélisée par la réaction d'équation :

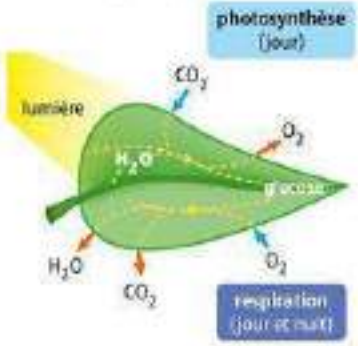
$$C_6H_{12}O_6\,(aq) + 6\,O_2\,(g) \rightarrow 6\,CO_2\,(g) + 6\,H_2O\,(\ell)$$

Dans la **journée**, grâce à la **chlorophylle** et à l'**énergie lumineuse**, la plante transforme l'eau qu'elle puise dans le sol et le dioxyde de carbone se trouvant dans l'atmosphère et capté par ses feuilles en glucose et en dioxygène selon la réaction d'équation :

$$6\,CO_2\,(g) + 6\,H_2O\,(\ell) \rightarrow C_6H_{12}O_6\,(aq) + 6\,O_2\,(g)$$

Cette transformation, inverse de la précédente, n'est pas spontanée.

Les **végétaux chlorophylliens** sont capables de fabriquer eux-mêmes de la matière organique et de consommer du dioxyde de carbone (FIG. 7).



Ce phénomène est un élément essentiel pour limiter les émissions croissantes de dioxyde de carbone dues à l'activité humaine, donc pour lutter contre le réchauffement climatique.



FIG. 7 La forêt amazonienne, le « poumon » de la Terre.

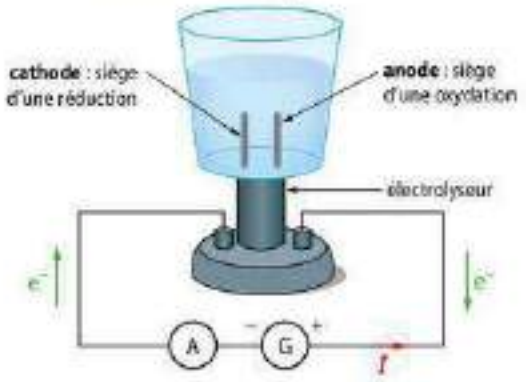
Le vocabulaire à retenir
Les relations à connaître

1 Transformations forcées

- Pour une transformation non totale **A** + **B** ⇄ **C** + **D** lorsque $Q_{r,i} < K(T)$, le système évolue spontanément dans le **sens direct**.
$Q_{r,i}$ étant le quotient de réaction et K la constante d'équilibre de la même réaction.
- Un générateur de tension continue peut forcer le système chimique à évoluer dans le **sens opposé** à son sens d'évolution spontanée.

2 L'électrolyseur

- Un **électrolyseur** est composé d'une cuve contenant deux électrodes reliées à un générateur.



- **Quantité de charges électriques mise en jeu lors d'une électrolyse**

Intensité du courant délivré par le générateur (en A)
quantité de charges électriques (en C) → $q = I \cdot \Delta t$ ← durée de l'électrolyse (en s)

quantité de matière d'électrons échangés durant l'électrolyse (en **mol**)
quantité de charges électriques (en C) → $q = n(e^-) \cdot N_A \cdot e$ ← charge élémentaire (en C)
constante d'Avogadro

$e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C $\quad N_A = 6{,}02 \times 10^{23}$ mol^{-1}

3 Stockage et conversion d'énergie chimique

- **Stocker de l'énergie**, c'est conserver une quantité d'énergie pour une utilisation future.
- Une **pile** convertit l'énergie chimique en énergie électrique grâce à une **réaction d'oxydoréduction** spontanée.
- Un **accumulateur** est capable de fonctionner en **pile** lors de la **décharge** en convertissant l'énergie chimique en énergie électrique ou en **électrolyseur** lors de la charge.
Les réactions aux électrodes traduisant la charge et la décharge sont opposées.
- Le développement des **piles à combustible** ou des **accumulateurs lithium-ion** permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre pour lutter contre le réchauffement climatique.

Vérifier l'essentiel

EN AUTONOMIE

Pour chaque question, choisir la ou les bonnes réponses. ➡ SOLUTIONS EN PAGE 593





1 Transformations forcées

	A	B	C
1 Pour forcer une transformation chimique, on utilise :	un générateur de tension alternative.	une pile.	un générateur de tension continue.

2 L'électrolyseur

	A	B	C
2 Lors d'une électrolyse, les porteurs de charges qui se déplacent en solution aqueuse sont :	les ions.	les électrons.	les atomes.
3 Lors d'une électrolyse, les porteurs de charges qui se déplacent dans le circuit sont :	les ions.	les électrons.	les atomes.
4 Lors d'une électrolyse, l'anode :	est reliée à la borne + du générateur.	est le siège d'une réduction.	attire des cations.
5 Lors de l'électrolyse de l'eau $2\,H_2O\,(\ell) \rightleftarrows 2\,H_2\,(g) + O_2\,(g)$ la quantité de charges électriques q traversant le système parcouru par une intensité $I = 250$ mA pendant une durée $\Delta t = 3{,}0$ min est :	$q = 750$ C	$q = 45$ C	$q = 0{,}75$ C
6 D'après l'énoncé de la question 5, la quantité de matière d'électrons échangés $n(e^-)$ est :	$n(e^-) = 7{,}8 \times 10^{-6}$ mol	$n(e^-) = 7{,}8 \times 10^{-3}$ mol	$n(e^-) = 4{,}7 \times 10^{-4}$ mol
7 Lors de l'électrolyse de l'eau $2\,H_2O\,(\ell) \rightleftarrows 2\,H_2\,(g) + O_2\,(g)$ on peut écrire :	$n(H_2) = 2 \times n(e^-)$	$n(H_2) = n(e^-)$	$n(H_2) = \frac{1}{2} \times n(e^-)$

3 Stockage et conversion d'énergie chimique

	A	B	C
8 Une pile convertit l'énergie chimique en énergie électrique grâce à :	une réaction acide-base.	une réaction d'oxydoréduction.	une dilution.
9 Lors de la charge d'un accumulateur, il y a conversion :	d'énergie chimique en énergie électrique.	d'énergie électrique en énergie chimique.	d'énergie lumineuse en énergie électrique.
10 La photosynthèse se déroule :	le jour.	la nuit.	toute la journée.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Acquérir les bases

1 Transformations forcées

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Savoir comment forcer une transformation chimique.
- Écrire l'équation bilan d'une réaction forcée.

Acquérir les bases : 12 S'entraîner : 18 24

11 Forcer une transformation

- *Dans un bécher, on mélange 25 mL d'une solution aqueuse de thiosulfate de sodium ($2\,Na^+$ (aq), $S_2O_3^{2-}$ (aq)) de concentration en quantité de matière $c_1 = 1{,}0\ mol \cdot L^{-1}$ et 25 mL d'une solution aqueuse jaune-orangée de diiode I_2 (aq) de concentration en quantité de matière $c_2 = 1{,}0 \times 10^{-2}\ mol \cdot L^{-1}$. La solution devient incolore.*

Données :

- *Couples oxydant-réducteur : $S_4O_6^{2-}$ (aq) / $S_2O_3^{2-}$ (aq) ; I_2 (aq) / I^- (aq) ; H_2O (ℓ) / H_2 (g) ; O_2 (g) / H_2O (ℓ).*
- *Seul le diiode est coloré.*

1. Écrire l'équation de la réaction modélisant la transformation.

- *On verse le mélange dans un tube en U et on place une électrode de graphite à chaque ouverture que l'on relie à un générateur délivrant une tension continue de 12 V. On observe des bulles de gaz à une électrode et la solution redevient jaune-orangée.*

2. Écrire les demi-équations modélisant les transformations à chaque électrode.

3. Quel est le rôle du générateur ?

12 Dans quel sens ?

On considère deux équilibres chimiques d'équations :

$$Cu\,(s) + 2\,Ag^+\,(aq) \rightleftarrows Cu^{2+}\,(aq) + 2\,Ag\,(s) \quad (1)$$

$$Cu^{2+}\,(aq) + 2\,Ag\,(s) \rightleftarrows Cu\,(s) + 2\,Ag^+\,(aq) \quad (2)$$

- *On verse dans un bécher un même volume V = 50 mL de solutions aqueuses de sulfate de cuivre (Cu^{2+} (aq), SO_4^{2-} (aq)) et de nitrate d'argent (Ag^+ (aq), NO_3^- (aq)). La solution de sulfate de cuivre est bleue, celle de nitrate d'argent, incolore.*
- *On plonge ensuite une lame d'argent et une lame de cuivre dans le bécher. Après mélange, on observe un dépôt gris et une coloration bleue plus intense.*



1. Parmi les deux réactions proposées, quelle est celle associée à la transformation chimique observée ?

2. On verse la solution dans un électrolyseur que l'on branche à un générateur délivrant une tension continue.

a. Écrire l'équation de la réaction modélisant la transformation.

b. Qu'observera-t-on dans l'électrolyseur ?

2 L'électrolyseur

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Modéliser et schématiser les transferts d'électrons aux électrodes par des réactions électrochimiques.
- Déterminer les variations de quantité de matière à partir de la durée de l'électrolyse et de la valeur de l'intensité du courant.

Acquérir les bases : 14 S'entraîner : 23 25

DONNÉES

- $N_A = 6{,}02 \times 10^{23}\ mol^{-1}$; $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C.

13 Électrolyse

On introduit une solution de chlorure de nickel (Ni^{2+} (aq), $2\,Cl^-$ (aq)) dans un électrolyseur dont la cathode est en graphite et l'anode en platine.

Données :

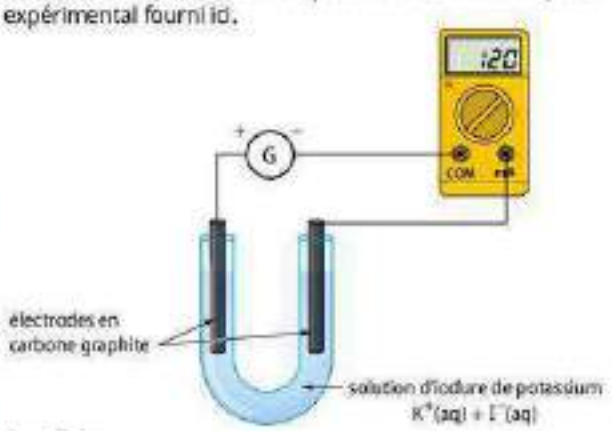
- *Couples oxydant-réducteur : Ni^{2+} (aq) / Ni (s) ; Cl_2 (g) / Cl^- (aq).*

1. Écrire les demi-équations se produisant à chaque électrode et préciser le type de transformation.
En déduire l'équation de réaction de la transformation.

2. Faire un schéma du montage en indiquant les bornes du générateur, le sens de circulation des électrons et le sens du mouvement des ions en solution.

14 Électrolyse d'une solution d'iodure de potassium

On réalise l'électrolyse d'une solution aqueuse d'iodure de potassium (K^+ (aq), I^- (aq)) dans un tube en U dans lequel on place des électrodes de graphite reliées à un générateur de tension continue et un ampèremètre selon le dispositif expérimental fourni ici.



Données :

- *Couples oxydant-réducteur : K^+ (aq) / K (s) ; I_2 (aq) / I^- (aq) ; H_2O (ℓ) / H_2 (g) ; O_2 (g) / H_2O (ℓ).*

1. Préciser le sens du courant et le sens de circulation des électrons.

2. Quelles sont les demi-équations d'oxydoréduction susceptibles de se produire :

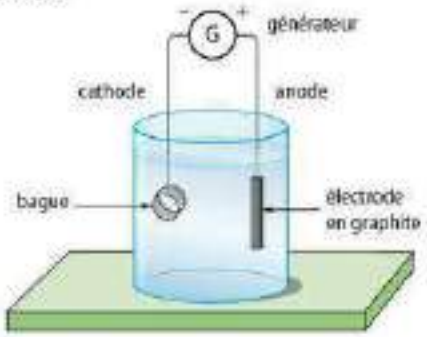
a. à la cathode ?

b. à l'anode ?

3. On observe un dégagement gazeux à la cathode, mais pas à l'anode. En déduire la réaction se déroulant effectivement à chaque électrode.

15 Bague plaquée or

Pour fabriquer les bijoux plaqués or, on dépose par électrolyse une fine couche d'or, de l'ordre de 10 µm, sur un bijou en bronze. Par exemple, on plonge une bague dans un bain de cyanure d'or (Au^{3+} (aq), 3 CN^- (aq)) où la bague sert de cathode et une électrode de graphite sera utilisée comme anode.



Données :
- *Couple oxydant-réducteur : Au^{3+} (aq) / Au (s).*
- *Masse molaire atomique $M_{Au} = 197\ g \cdot mol^{-1}$.*

1. Quel est l'intérêt d'utiliser la bague comme cathode ?
2. Écrire l'équation de la réaction se produisant à cette électrode. De quel type de transformation s'agit-il ?
3. On souhaite déposer une masse $m = 59\ \mu g$ d'or sur la bague.
   a. Calculer la quantité de matière d'or à déposer sur la bague.
   b. Calculer la quantité de matière d'électrons nécessaire pour réaliser ce dépôt.
   c. Déterminer la durée Δt de l'électrolyse sachant qu'elle est réalisée avec un courant d'intensité constante $I = 20$ mA.

16 Production de dichlore Cl_2

Pour produire industriellement le dichlore, on réalise l'électrolyse d'une solution de chlorure de sodium (Na^+ (aq), Cl^- (aq)) concentrée sous une tension continue $U = 3{,}8$ V et un courant d'intensité constante $I = 45$ kA.

Données :
- *Couple oxydant-réducteur : Cl_2 (g) / Cl^- (aq).*
- *Volume molaire dans les conditions de l'expérience : $V_m = 24\ L \cdot mol^{-1}$.*

1. Écrire la demi-équation électronique d'oxydoréduction permettant d'obtenir du dichlore. À quelle électrode cette réaction se produit-elle ?
2. Quelle est la quantité de charges électriques q mise en jeu en une journée ?
3. À quelle quantité de matière d'électrons cette quantité de charges correspond-elle ?
4. En déduire la quantité de matière de dichlore $n(Cl_2)$ produite en une journée.
5. Quel volume de dichlore est obtenu par jour ?

3 Stockage et conversion d'énergie chimique

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Citer des exemples de dispositifs.
- Connaître les enjeux sociétaux associés.

→ Acquérir les bases : 17 → S'entraîner : 25

17 Vers l'autonomie énergétique

En 2012, le projet MYRTE (Mission hydrogène renouvelable pour l'intégration au réseau électrique) a vu le jour en Corse pour permettre à des régions isolées de produire de l'électricité en utilisant des énergies renouvelables.

La Corse étant une région à fort ensoleillement, cela semblait logique d'y installer des panneaux photovoltaïques pour produire l'électricité sans produire de gaz à effet de serre. L'intérêt innovant de ce projet se trouve dans la seconde partie de l'installation. En effet, ces panneaux sont couplés à des électrolyseurs qui permettent la décomposition de la molécule d'eau en dihydrogène et dioxygène.

Le dihydrogène, stocké dans des citernes, peut être utilisé dans une pile à combustible.

1. Quelle conversion d'énergie est réalisée dans une pile à combustible ?
2. Expliquer, en rédigeant quelques lignes, comment le dispositif MYRTE permet d'être autonome en énergie.
3. Quel est le caractère innovant de ce type de dispositif ?

Faire le point avant d'aller plus loin

PRÉPA BAC

Pour vérifier ses connaissances, répondre aux questions suivantes (sans regarder le cours !)

- Comment peut-on forcer une réaction chimique ?
- Schématiser le dispositif expérimental d'une électrolyse.
- Quels sont les enjeux sociétaux associés aux dispositifs de conversion et de stockage d'énergie ?
- Quelle transformation se produit à la cathode lors d'une électrolyse ? et à l'anode ?
- Citer des exemples de dispositifs de conversion et stockage d'énergie chimique.
- Comment peut-on calculer la quantité de charges électriques mise en jeu lors d'une électrolyse ?
- Quelle est la relation entre les différentes quantités de matière dans cette demi-équation ? $Cu\ (s) = Cu^{2+}\ (aq) + 2\ e^-$

Retrouver ces questions en version numérique — Flash Page cartes mémos

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Exercice résolu EN AUTONOMIE

18 Purification du cuivre



Le métal cuivre obtenu à partir de son minerai contient habituellement des impuretés comme du nickel. Pour éliminer ces impuretés, on réalise l'électrolyse d'une solution de sulfate de cuivre (Cu^{2+} (aq), SO_4^{2-} (aq)) acidifiée. La cathode est composée de cuivre pur et l'anode est un bloc de cuivre impur.

Dans les conditions de cette électrolyse, le nickel peut être oxydé et les ions nickel Ni^{2+} (aq) ne peuvent pas être réduits. Cette électrolyse dure 21 jours et permet d'obtenir 300 kg de cuivre.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- La **composition** de chaque électrode est indiquée.

Données :

- *Couples oxydant-réducteur : Cu^{2+} (aq) / Cu (s) ; Ni^{2+} (aq) / Ni (s).*
- *$M_{Cu} = 63{,}5\ g \cdot mol^{-1}$; $N_A = 6{,}02 \times 10^{23}\ mol^{-1}$; $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C.*

1. **Déterminer** les demi-équations pouvant se produire à chaque électrode. Pourquoi cette électrolyse conduit-elle à du cuivre pur ?
2. **Calculer** la quantité de matière de cuivre formé et celle d'électrons échangés.
3. **Exprimer** l'intensité constante du courant requise pour réaliser cette électrolyse, puis calculer sa valeur.

LES VERBES D'ACTION

- **Déterminer** : mettre en œuvre une stratégie pour trouver un résultat.
- **Calculer** : trouver la valeur par le calcul.
- **Exprimer** : donner une relation littérale entre des grandeurs.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. • **L'anode** est le siège d'une oxydation, on peut avoir les demi-équations

$$\mathbf{Cu\,(s) = Cu^{2+}\,(aq) + 2\,e^-} \quad \text{et} \quad \mathbf{Ni\,(s) = Ni^{2+}\,(aq) + 2\,e^-}$$

• La **cathode** est le siège d'une réduction, on peut avoir :

$$\mathbf{Cu^{2+}\,(aq) + 2\,e^- = Cu\,(s)}$$

Le nickel est éliminé à l'anode, et la cathode reste en cuivre pur.

2. • La quantité de matière de cuivre formé est :

$$n(Cu) = \frac{m(Cu)}{M_{Cu}} = \frac{300 \times 10^3}{63{,}5} \text{ soit } \mathbf{n(Cu) = 4{,}7 \times 10^3\ mol.}$$

• La quantité de matière d'électrons échangés est :

$n(e^-) = 2 \times n(Cu) = 2 \times 4{,}7 \times 10^3$ soit $\mathbf{n(e^-) = 9{,}4 \times 10^3\ mol.}$

3. • On sait que : $q = I \cdot \Delta t = n(e^-) \cdot N_A \cdot e$ donc :

$$I = \frac{n(e^-) \cdot N_A \cdot e}{\Delta t} = \frac{9{,}4 \times 10^3 \times 6{,}02 \times 10^{23} \times 1{,}6 \times 10^{-19}}{21 \times 24 \times 3\,600} \text{ soit } \mathbf{I = 5{,}0 \times 10^2\ A.}$$

QUELQUES CONSEILS

1. Lors d'une électrolyse, la cathode est le siège d'une réduction et l'anode, le siège d'une oxydation.

EXERCICE SIMILAIRE

19 Électrolyse du titane

On réalise l'électrolyse pendant 1,0 h sous un courant d'intensité constante $I = 200$ mA d'une solution contenant des ions titane Ti^{n+} (aq). Il se forme 179 mg de titane sur une des deux électrodes.



Données :

- *Couple oxydant-réducteur : Ti^{n+} (aq) / Ti (s).*
- *$M_{Ti} = 47{,}9\ g \cdot mol^{-1}$; $N_A = 6{,}02 \times 10^{23}\ mol^{-1}$; $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C.*

1. À quelle électrode le titane s'est-il formé ? Justifier la réponse.
2. Quelle est la quantité de matière d'électrons échangés ?
3. Calculer la quantité de matière de titane formé.
4. Écrire la demi-équation modélisant la transformation des ions titane. En déduire la charge des ions titane.

Exercice résolu — EN AUTONOMIE

20 Chromage d'une pièce métallique



Pour chromer une pièce métallique de surface $S = 50\ cm^2$, on réalise l'électrolyse d'une solution contenant des ions chrome Cr^{3+} (aq). On souhaite déposer une couche de chrome d'épaisseur $e = 40\ \mu m$ sur la pièce.

L'électrolyseur est alimenté par un générateur de tension continue délivrant un courant d'intensité constante $I = 2,5\ A$.

Données :
- *Couple oxydant-réducteur : Cr^{3+} (aq) / Cr (s).*
- *$M_{Cr} = 52\ g \cdot mol^{-1}$; $\rho_{Cr} = 7,2\ g \cdot cm^{-3}$; $N_A = 6,02 \times 10^{23}\ mol^{-1}$; $e = 1,6 \times 10^{-19}\ C$.*

1. À quelle électrode doit-on placer la pièce métallique ? Justifier la réponse.
2. **Calculer** la quantité de matière de chrome à déposer sur la pièce.
3. **En déduire** la quantité de matière d'électrons échangés.
4. **Déterminer** la durée de l'électrolyse pour réaliser le chromage de la pièce.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- Ces **valeurs** permettent de calculer le volume de chrome.

LES VERBES D'ACTION

- **Calculer** : trouver la valeur par le calcul.
- **En déduire** : intégrer le résultat précédent pour répondre.
- **Déterminer** : mettre en œuvre une stratégie pour trouver un résultat.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. On souhaite former du chrome en réalisant une réduction. La pièce métallique doit servir de **cathode**.

2. La masse de chrome est : $m_{Cr} = \rho_{Cr} \cdot V$.
$V = S \times e$ donc $m_{Cr} = \rho_{Cr} \cdot S \cdot e$.
AN : $m_{Cr} = 7,2 \times 50 \times 40 \times 10^{-4}$ soit $\boldsymbol{m_{Cr} = 1,4\ g}$.
La quantité de matière de chrome à déposer est :
$n(Cr) = \dfrac{m_{Cr}}{M_{Cr}} = \dfrac{1,4}{52}$ soit $\boldsymbol{n(Cr) = 2,7 \times 10^{-2}\ mol}$.

3. La demi-équation pour le couple Cr^{3+} (aq) / Cr (s) s'écrit :
$$Cr^{3+}\ (aq) + 3\ e^- = Cr\ (s)$$
La quantité de matière d'électrons échangés est donc :
$n(e^-) = 3 \times n(Cr) = 3 \times 2,7 \times 10^{-2}$ soit $\boldsymbol{n(e^-) = 8,1 \times 10^{-2}\ mol}$.

4. La quantité de charges électriques échangées est $q = I \cdot \Delta t = n(e^-) \cdot N_A \cdot e$.
On en déduit la durée de l'électrolyse : $\Delta t = \dfrac{n(e^-) \cdot N_A \cdot e}{I}$,
AN : $\Delta t = \dfrac{8,1 \times 10^{-2} \times 6,02 \times 10^{23} \times 1,6 \times 10^{-19}}{2,5}$
soit $\boldsymbol{\Delta t = 3,1 \times 10^3\ s = 52\ min}$.

QUELQUES CONSEILS

2. Utiliser des unités cohérentes.

EXERCICE SIMILAIRE

21 Nettoyage d'une antiquité

Un canon appartenant à un galion espagnol a été retrouvé au fond de la mer. Il était recouvert d'une gangue formant une sorte de ciment qui le protégeait.

Une fois remonté à la surface, on le traite par électrolyse dans une solution d'hydroxyde de potassium (K^+ (aq), HO^- (aq)) pour détruire la gangue. Le canon sert d'électrode où se forme du dihydrogène pendant le traitement visant à faire tomber la gangue.

On réalise cette électrolyse pendant 36 h avec un courant d'intensité constante $I = 80\ mA$.



Données :
- *Couple oxydant-réducteur : H_2O (ℓ) / H_2 (g).*
- *$N_A = 6,02 \times 10^{23}\ mol^{-1}$; $e = 1,6 \times 10^{-19}\ C$; $V_m = 24\ L \cdot mol^{-1}$ (volume molaire dans les conditions de l'expérience).*

1. a. Le canon sert-il d'anode ou de cathode ? Justifier la réponse.
b. Écrire la demi-équation s'y produisant.
2. Déterminer la quantité de matière d'électrons échangés.
3. En déduire le volume de dihydrogène formé.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

S'entraîner pour maîtriser

SAVOIR RÉDIGER

22 Proposer une correction de la solution donnée par l'élève à l'énoncé.

Énoncé

On mélange dans un bécher 50 mL d'une solution de sulfate de cuivre (Cu^{2+} (aq), SO_4^{2-} (aq)) de concentration en quantité de matière $c_1 = 0{,}10$ mol · L^{-1} avec 50 mL d'une solution de sulfate de zinc (Zn^{2+} (aq), SO_4^{2-} (aq)) de concentration en quantité de matière $c_2 = 0{,}10$ mol · L^{-1}. On rajoute dans le même bécher 5 mg de poudre de cuivre et 5 mg de poudre de zinc.

La constante d'équilibre K(*T*) associée à la réaction d'équation :

$$Cu^{2+}(aq) + Zn(s) \rightleftharpoons Cu(s) + Zn^{2+}(aq)$$

est égale à $2{,}0 \times 10^{37}$.

Données :

- $M_{Cu} = 63{,}5$ g · mol^{-1} ; $M_{Zn} = 65{,}4$ g · mol^{-1} ;
- $N_A = 6{,}02 \times 10^{23}$ mol^{-1} ; $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C.

1. Déterminer le quotient de réaction $Q_{r,i}$ à l'état initial et en déduire le sens d'évolution du système.

2. On verse le mélange dans un électrolyseur et on réalise une électrolyse pendant une durée $\Delta t = 30$ min avec une intensité $I = 200$ mA. Quel métal va se former lors de l'électrolyse ?

3. Déterminer la quantité de charges électriques mise en jeu lors de cette électrolyse.

4. Déterminer la masse de métal formé.

Solution proposée par un élève

1. La concentration initiale en ions cuivre est : $[Cu^{2+}(aq)]_i = c_1 = 0{,}10$ mol · L^{-1}
La concentration initiale en ions zinc est : $[Zn^{2+}(aq)]_i = c_2 = 0{,}10$ mol · L^{-1}.
} Prendre le volume total du mélange

Le quotient de réaction à l'état initial est :

$Q_{r,i} = \dfrac{[Zn^{2+}]_i}{[Cu^{2+}]_i}$ soit $Q_{r,i} = 1$. $Q_{r,i} < K$ donc l'évolution du système se fait dans le sens direct de l'équation donnée.

2. Si l'on force la transformation grâce à un générateur, elle se fera dans le sens opposé de l'équation donnée, donc on formera du zinc.

3. La quantité de charges électriques mise en jeu est : $q = I \cdot \Delta t = 200 \times 30 = 6\,000$ C. } Faire attention aux unités

4. D'après la demi-équation : $Zn^{2+}(aq) + 2\,e^- = Zn(s)$, on a :

$n(Zn) = \dfrac{1}{2} n(e^-)$ avec $n(e^-) = \dfrac{q}{N_A \cdot e}$, donc $n(Zn) = \dfrac{q}{2 N_A \cdot e} = \dfrac{6\,000}{2 \times 6{,}02 \times 10^{23} \times 1{,}6 \times 10^{-19}}$

soit $n(Zn) = 0{,}031$ mol.

La masse de zinc formé est : $m(Zn) = n(Zn) \cdot M_{Zn} = 0{,}031 \times 65{,}4$ soit $m(Zn) = 2{,}0$ g.

DONNÉES

- $N_A = 6{,}02 \times 10^{23}$ mol^{-1} ; $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C.

23 Accumulateur lithium-ion HISTOIRE DES SCIENCES

L'accumulateur lithium-ion se cache dans de nombreux appareils de notre quotidien : téléphones portables, ordinateurs, mais aussi dans nos voitures électriques. Certains l'imaginent même jouer un rôle majeur dans notre transition vers un recours massif aux énergies renouvelables.

En 2019, la *Royal Swedish Academy of Sciences* a décidé d'attribuer le prix Nobel de chimie aux trois pionniers du développement de cette technologie : l'Américain John Goodenough, le Britannique Stanley Whittingham et le Japonnais Akira Yoshino.



Dans les années 1970, en pleine crise pétrolière, Stanley Whittingham s'est mis en quête de sources d'énergie non-fossiles et propose un accumulateur révolutionnaire au lithium capable de fournir une tension de 2 V.

En 1980, John Goodenough modifie le matériau constituant la cathode et arrive à produire une tension de 4 V. Mais c'est grâce à Akira Yoshino que l'on a pu obtenir, quelques années plus tard, le tout premier accumulateur lithium-ion commercialisable : un accumulateur léger, résistant et qui peut être chargé des centaines de fois sans que ses performances ne se détériorent trop. Toute l'électronique en a été révolutionnée et miniaturisée.

1. Quel a été le déclencheur pour développer cette nouvelle technologie ?

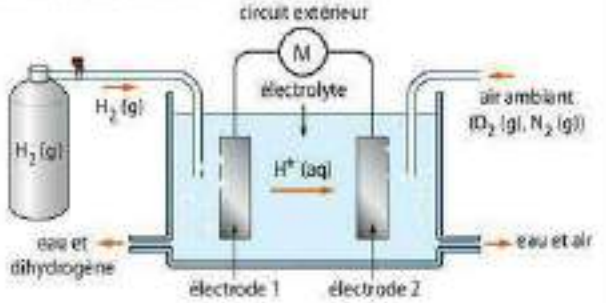
2. Pourquoi ce type d'accumulateur a-t-il révolutionné l'électronique ?

3. Quels sont ses avantages ?

24 Principe de la pile à hydrogène

La pile à hydrogène est constituée de deux électrodes et d'un électrolyte dans lequel se déplacent les ions.

Les réactions chimiques d'oxydoréduction ont lieu à la surface des électrodes.



Au niveau de l'électrode 1, les molécules de dihydrogène H_2 (g), provenant d'un réservoir, sont oxydées en ions H^+ (aq) qui se déplacent dans la solution électrolytique.

Au niveau de l'électrode 2, des électrons, des ions hydrogène H^+ (aq) de l'électrolyte et des molécules de dioxygène O_2, provenant de l'air ambiant, se combinent pour donner de l'eau.

On écrira l'équation de la réaction modélisant la transformation chimique qui a lieu au sein de la pile lors de son fonctionnement ainsi :

$$2\,H_2\,(g) + O_2\,(g) \rightleftharpoons 2\,H_2O\,(\ell)$$

Données :

- *Couples oxydant-réducteur : H^+ (aq) / H_2 (g) ; O_2 (g) / H_2O (ℓ).*
- *$V_m = 24$ L · mol^{-1} (volume molaire d'un gaz dans les conditions d'utilisation de la pile à hydrogène).*

1. Quel intérêt la pile à hydrogène présente-t-elle pour l'environnement ?

2. Écrire la demi-équation électronique se produisant à chaque électrode.

3. Donner l'expression de la quantité de matière d'électrons échangés $n(e^-)$ en fonction de la quantité de matière de dihydrogène initial $n_i(H_2)$.

4. Expliquer pourquoi le dihydrogène est le réactif limitant.

5. On suppose que la pile s'arrête de fonctionner lorsque le réactif limitant est épuisé au bout d'une durée notée Δt. Déterminer l'expression littérale de la quantité de matière $n_i(H_2)$ du réactif limitant en fonction de l'intensité I du courant, de la durée Δt, de la constante d'Avogadro N_A et de la charge élémentaire e.

6. Calculer le volume de dihydrogène consommé pendant une durée de fonctionnement de 200 h et pour une intensité moyenne du courant électrique débité par la pile $I = 200$ A.

7. Au regard de ce résultat, quel inconvénient peut présenter l'utilisation de la pile à hydrogène dans les conditions usuelles de pression et de température ?

25 Voyage sur Mars

Les agences spatiales élaborent des plans pour pouvoir un jour aller sur Mars. L'atmosphère de cette planète est composée de 95,3 % de dioxyde de carbone.



Il est nécessaire de fabriquer du dioxygène sur place pour les spationautes. Une solution envisageable est l'électrolyse de l'eau extraite du sol martien.

Les deux couples oxydant-réducteur mis en jeu lors de cette électrolyse sont : O_2 (g) / H_2O (ℓ) et H_2O (ℓ) / H_2 (g).

Chaque minute, pour une respiration normale, nos poumons envoient un volume $V = 0{,}30$ L de dioxygène vers les tissus (ou les cellules) humains.

Donnée :

- *Volume molaire d'un gaz : $V_m = 25$ L · mol^{-1} à 25 °C et sous une pression $P = 10^5$ Pa.*

DÉMARCHE EXPERTE

Quelle doit être l'intensité I supposée constante du courant délivré par l'électrolyseur pour former le dioxygène nécessaire à la respiration d'un spationaute durant une journée ?

DÉMARCHE AVANCÉE

1. Écrire les deux demi-équations électroniques, puis l'équation d'oxydoréduction modélisant la transformation lors de l'électrolyse.

2. Déterminer la quantité de matière de dioxygène $n(O_2)$ nécessaire aux tissus humains durant une journée.

3. Quelle est la quantité de matière d'électrons échangés $n(e^-)$?

4. Calculer la charge électrique mise en jeu par l'électrolyseur.

5. En déduire l'intensité I du courant traversant l'électrolyseur.

26 Cadmium manufacture

Cadmium is a metal used in certain batteries. It is obtained industrially by electrolysis of an aqueous solution of cadmium sulphate (Cd^{2+} (aq), SO_4^{2-} (aq)) mixed with sulphuric acid ($2\,H^+$ (aq), SO_4^{2-} (aq)).

The current, which is kept constant during electrolysis, is 25.0 kA.

Data:

- *Redox couples: Cd^{2+} (aq) / Cd (s); H^+ (aq) / H_2 (g); O_2 (g) / H_2O (ℓ); $S_2O_8^{2-}$ (aq) / SO_4^{2-} (aq); SO_4^{2-} (aq) / SO_2 (g).*
- *Molar volume under the conditions of the experiment: $V_m = 24$ L/mol.*
- *Molar mass of cadmium $M_{Cd} = 112.4$ g/mol.*

1. Write down any half equations that may occur at each electrode.

2. During electrolysis, a metallic deposit is formed at the cathode and a gas is formed at the anode. What products are formed? Write the equation of the transformation taking place.

3. What is the mass of the metal formed after 24 hours?

4. Determine the volume of gas formed at the anode during the same time period.

I CONFIRM THAT I HAVE...

- clearly identified the type of reaction occurring at the anode and cathode.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

27 Étamage des boîtes de conserve



L'étamage consiste à recouvrir certaines boîtes de conserve d'étain Sn (s). Il est réalisé par électrolyse d'une solution contenant des ions étain Sn^{2+} (aq) sous un courant d'intensité constante $I = 6{,}0$ A.

Une des électrodes utilisées est en étain, l'autre est la boîte de conserve.

On souhaite réaliser l'étamage intérieur et extérieur d'une boîte de diamètre 73 mm et de hauteur $h = 109$ mm à raison d'une masse de 0,50 g d'étain par mètre carré.

Données :

- *Couple oxydant-réducteur : Sn^{2+} (aq) / Sn(s).*
- *Masse molaire de l'étain $M_{Sn} = 118{,}7\ g \cdot mol^{-1}$.*

1. Déterminer la quantité de matière d'étain à déposer sur la boîte

2. Quelle est la durée Δt de l'électrolyse ?

Coups de pouce

- *R* est le rayon d'un disque et *h* la hauteur d'un cylindre.
- Aire d'un disque : $\mathcal{A} = \pi R^2$.
- Aire latérale d'un cylindre : $\mathcal{A}_{latérale} = 2 \pi R \cdot h$.

28 Approche du bilan d'une électrolyse par Python

Le programme en langage Python fourni permet de calculer la quantité de charges électriques q échangée lors d'une électrolyse.

On note I l'intensité constante du courant délivrée par l'électrolyseur, $n(e^-)$ la quantité de matière d'électrons échangés et Δt la durée de l'électrolyse.

1. Écrire la fin du programme permettant de déterminer la durée Δt de l'électrolyse connaissant l'intensité I et la quantité de matière d'électrons $n(e^-)$.

JE VÉRIFIE QUE J'AI...

- bien appliqué les formules permettant d'obtenir q et Δt ;
- converti correctement les grandeurs.

2. On réalise l'électrolyse pendant une durée $\Delta t = 5{,}0$ min et sous un courant d'intensité $I = 2{,}0$ A.

a. Quelle est la quantité de charges électriques échangées ?

b. Quelle est la quantité de matière d'électrons échangés ?

```
print("Utilisation de la relation I = q / deltat = n(e) * (NA * e) /deltat")
print()
print("Que devez-vous calculer? I, n(e) ou deltat ?")
a=input("choix? : ")
NA=6.022140876e23   # constante d'Avogadro
e=1.602176634e-19   # charge élémentaire
if a == 'I':
    b=float(input("quantité de matière d'électrons (en mol) n(e) = "))
    c=float(input("durée de fonctionnement (en s) deltat = "))
    q=NA*e*b
    d=NA*e*b/c
    print("Quantité de charges électriques (en C) q = ", round(q,4), " C")
    print("Intensité du courant électrique (en A) I = ", round(d,4), " A")
if a== 'n(e)':
    b=float(input("intensité du courant électrique I(A) = "))
    c=float(input("durée de fonctionnement (en s) deltat = "))
    q=b*c
    d= b*c/(NA*e)
    print("Quantité de charges électriques (en C) q = ", round(q,4), " C")
    print("Quantité de matière d'électrons' (en mol) n(e) = %.3e"%d , " mol")
```

À L'ORAL

29 Autonomie énergétique

Préparer un exposé oral permettant d'expliquer comment on pourrait être autonome énergétiquement sans utiliser de source d'énergie polluante.

Les mots-clés à utiliser

- panneaux photovoltaïques
- gaz à effet de serre
- batterie lithium-ion
- éolienne
- électrolyseur
- pile à combustible
- dihydrogène
- conversion d'énergie
- stockage

Ce court exposé devra pouvoir être réalisé sans note écrite.

30 RETOUR SUR LA PAGE D'OUVERTURE



Préparer un exposé oral expliquant comment les alternatives proposées dans le secteur du transport permettront de lutter contre les émissions de gaz à effet de serre.

À la date de publication de ce manuel, les notions enseignées dans ce chapitre sont exclues de l'épreuve écrite.

Développer ses compétences

31 Rouler plus vert ! ANALYSE ET SYNTHÈSE DE DOCUMENTS

50 min

APP Rechercher et organiser l'information

Le transport est l'une des premières sources de production de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone. Pour lutter contre cette pollution au gaz, des solutions existent pour remplacer les moteurs classiques.

DOC 1 Différentes motorisations

La France possède un parc automobile de 39,5 millions de véhicules.

■ Les **véhicules à moteur à essence** consomment principalement de l'octane C_8H_{18}.

La combustion du C_8H_{18} en présence du dioxygène de l'air dans un moteur bien réglé produit du dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau.

En moyenne, la consommation de tels véhicules est de 6,0 L d'essence pour 100 km.

■ Les **voitures à moteur électrique** fonctionnent avec des accumulateurs lithium-ion. Ils doivent être branchés à une prise électrique pour être rechargés et ne produisent pas directement de gaz à effet de serre.

Le rendement du moteur électrique est proche de 100 %.

■ Les **voitures hybrides** possèdent deux motorisations : un moteur à essence classique et un moteur électrique.

■ Les **voitures utilisant une pile à combustible** consomme du dihydrogène H_2 (g) selon la réaction d'équation :

$$H_2(g) + O_2(g) \rightleftarrows 2\,H_2O(\ell)$$

Elles ne produisent pas directement de dioxyde de carbone. En moyenne, leur consommation est de 1 kg de dihydrogène pour 100 km.

DOC 3 Production de dihydrogène

La production mondiale de dihydrogène en 2018 est de 74 millions de tonnes.

96 % du dihydrogène est produit par le vaporeformage du méthane selon cette transformation :

$$CH_4(g) + 2\,H_2O(\ell) \rightarrow 4\,H_2(g) + CO_2(g)$$

Ce procédé nécessite de l'énergie.

Les industriels essaient d'augmenter la production de dihydrogène moyennant une méthode non polluante, l'électrolyse.



DOC 2 Production d'électricité

En France, l'électricité est produite à 72 % grâce aux centrales nucléaires.

Aux États-Unis, elle est davantage produite à partir du charbon, ce qui entraîne une plus grande émission de dioxyde de carbone.

La part d'électricité produite grâce aux énergies renouvelables (panneaux photovoltaïques, éoliennes, barrages) ne cesse d'augmenter mais peine à dépasser 15 % dans le monde.

DOC 4 Données

- Masse volumique de l'octane : $\rho = 810\ g \cdot L^{-1}$.
- Volume molaire d'un gaz : $V_m = 24\ L \cdot mol^{-1}$ à 20 °C et sous une pression $P = 1$ atm.
- Masses molaires atomiques :

$M_H = 1{,}0\ g \cdot mol^{-1}$; $M_C = 12\ g \cdot mol^{-1}$; $M_O = 16\ g \cdot mol^{-1}$.

ANALYSE

1. Écrire l'équation de la réaction de combustion complète de l'octane se produisant dans un moteur.
2. En considérant que l'essence est constituée uniquement d'octane, déterminer le volume de dioxyde de carbone produit par une voiture de motorisation classique après 100 km parcourus.
3. Si toutes les voitures du parc automobile français utilisaient une pile à combustible, déterminer la masse de dihydrogène nécessaire pour que chaque voiture effectue 100 km.
4. En considérant que ce dihydrogène est entièrement produit par vaporeformage du méthane, calculer le volume de dioxyde de carbone produit indirectement par une voiture au bout de 100 km.

SYNTHÈSE

Peut-on espérer voir baisser de façon sensible la production de dioxyde de carbone si la fabrication de véhicules fonctionnant avec une pile à combustible est réalisée à grande échelle ? Argumenter.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique.

À la date de publication de ce manuel, les notions enseignées dans ce chapitre sont exclues de l'épreuve écrite.

Retrouvez des exercices de synthèse p. 232

PRÉPA BAC

32 Le premier compteur électrique

ANALYSE ET SYNTHÈSE DE DOCUMENTS

40 min

APP Rechercher et organiser l'information

Thomas Edison fût à l'origine de plus de mille inventions. Parmi les plus célèbres, on peut citer l'ampoule à incandescence ou le phonographe mais il a aussi inventé le premier compteur électrique.

DOC 1 La compagnie d'électricité Edison

En 1882, l'Américain Thomas Edison (1847-1931) crée une centrale électrique à courant continu pouvant alimenter en électricité une petite partie de Manhattan (New York). Il inventa peu après le compteur électrique pour connaître la consommation de chaque usager. À cette époque, les habitants n'employaient l'électricité que pour les lampes à incandescence (inventées par Edison) ou pour faire fonctionner de petits moteurs à courant continu.



Quelques années plus tard, le courant continu fût abandonné au profit du courant alternatif qui comportait moins de pertes en ligne et permettait ainsi d'avoir des consommateurs abonnés beaucoup plus éloignés de la centrale électrique. Avec le courant continu, les clients devaient se trouver à moins de deux kilomètres de la centrale.

DOC 2 Le compteur électrique d'Edison

Une faible quantité du courant utilisé par le consommateur abonné servait à alimenter une cuve contenant deux électrodes de zinc trempant dans une solution aqueuse de sulfate de zinc (Zn^{2+} (aq), SO_4^{2-} (aq)).

Un employé de la compagnie passait une fois par mois chez les abonnés pour récupérer une des deux électrodes qu'il rinçait, séchait puis pesait pour évaluer la consommation de courant et ainsi établir la facture correspondante.

DOC 3 Données

Lors d'un relevé mensuel, l'employé relève une masse de 52 g de zinc déposé sur l'électrode.

- Couple oxydant-réducteur : Zn^{2+} (aq) / Zn (s).
- Masse molaire $M_{Zn} = 65{,}4\ g \cdot mol^{-1}$.
- $N_A = 6{,}02 \times 10^{-23}\ mol^{-1}$; $e = 1{,}6 \times 10^{-19}\ C$.

ANALYSE

1. Faire un schéma du compteur électrique d'Edison en précisant le nom des électrodes, le type de transformation se produisant sur chaque électrode et le mouvement des différents porteurs de charges.
2. Écrire les équations des réactions se produisant sur chaque électrode.
3. Quelle électrode a été prélevée pour mesurer la consommation d'énergie ?

SYNTHÈSE

En considérant que le compteur utilisait 10 % du courant électrique, comment calculer la consommation d'électricité (en Ah) figurant sur le relevé mensuel ?

VERS LE SUP'

33 Traitement d'une eau de piscine par électrolyse



Données :
• Couples oxydant-réducteur : H_2O (ℓ) / H_2 (g) ; Cl_2 (g) / Cl^- (aq).

Dans certaines piscines, on ajoute du chlorure de sodium (Na^+ (aq), Cl^- (aq)) à l'eau de la piscine. L'eau est pompée, puis traitée par électrolyse en passant entre deux électrodes reliées à un générateur délivrant un courant d'intensité constante $I = 15$ A.

1. Écrire les deux demi-équations d'oxydoréduction se produisant dans l'électrolyseur.
2. En déduire l'équation de la transformation.
3. Déterminer la quantité de matière de dichlore Cl_2 (g) formé au bout d'une heure.
4. Les ions hydroxyde HO^- (aq) et le dichlore formés sont consommés lors d'une nouvelle transformation chimique supposée rapide et totale :

$$Cl_2\ (g) + 2\ HO^-\ (aq) \rightarrow ClO^-\ (aq) + H_2O\ (\ell) + Cl^-\ (aq)$$

Par leur pouvoir antibactérien, les ions hypochlorite ClO^- (aq) désinfectent l'eau de la piscine.

Déterminer la quantité de matière d'ions hypochlorite qui peuvent être fabriqués en une heure de fonctionnement de l'électrolyseur.

À la date de publication de ce manuel, les notions enseignées dans ce chapitre sont exclues de l'épreuve écrite.

Production de dihydrogène

Contexte

On dispose de panneaux photovoltaïques sur le toit d'une maison et on souhaite utiliser l'électricité produite, habituellement vendue à un distributeur, pour alimenter un électrolyseur afin de décomposer l'eau en dihydrogène.

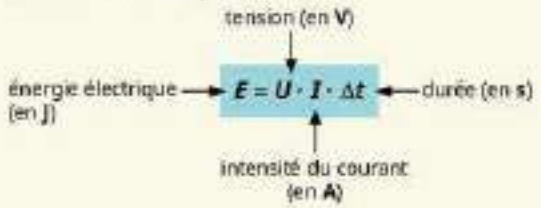
Cette solution est-elle financièrement intéressante ?



Documents mis à disposition

DOC 1 **Données**

- Volume molaire d'un gaz dans les conditions de pression et de température du laboratoire : $V_m = 24\ \text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$.
- Masse molaire $M_H = 1{,}0\ \text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$.
- Expression de l'énergie électrique E :



- $1\ \text{kWh} = 3{,}6 \times 10^6\ \text{J}$.
- Prix de vente du kWh au distributeur d'électricité : 0,10 €.
- Prix de vente d'un kilogramme de dihydrogène : 12 €.

Matériel mis à disposition

- Un générateur de tension continue 6 V
- Un électrolyseur
- Un ampèremètre, un voltmètre
- Fils électriques
- Un chronomètre
- Deux tubes à essais gradués de 25 mL
- Eau distillée

VIDÉO Mise en œuvre de l'électrolyse de l'eau



Travail à effectuer

1. (ANA) **Proposition de protocole expérimental** *(15 min conseillées)*

■ À partir des documents et du matériel disponible, proposer un protocole expérimental permettant de produire du dihydrogène.

Être en mesure de présenter le protocole

2. (REA) **Mise en œuvre du protocole expérimental proposé** *(15 min conseillées)*

■ Mettre en œuvre le protocole pour produire un volume $V = 20$ mL de dihydrogène en notant les valeurs des grandeurs électriques mesurées et la durée de l'expérience.
Schématiser l'expérience.

Être en mesure de présenter le dispositif expérimental

3. (VAL) **Exploitation des résultats obtenus** *(30 min conseillées)*

1. Calculer le coût de l'électricité consommée pour réaliser cette expérience.
2. Calculer le prix de vente du dihydrogène formé.
3. Cette opération est-elle rentable d'un point de vue économique ?

Défaire le montage et ranger la paillasse.

PISTE POUR LE GRAND ORAL PRÉPA BAC

Pour se préparer à l'Oral
➥ Livret LES CLÉS DU BAC
(en début de manuel)

UNE QUESTION

Comment l'accumulateur lithium-ion de mon smartphone fonctionne-t-il ?

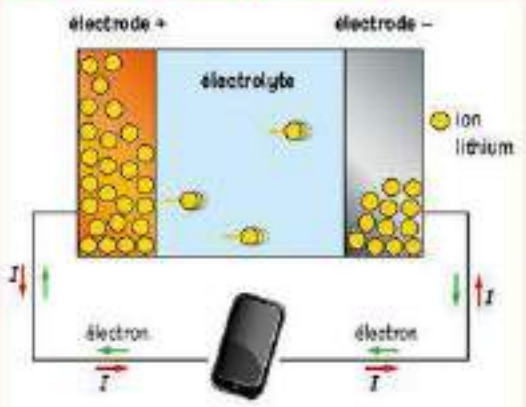
Enjeu de la question

Les appareils électroniques nomades sont omniprésents dans notre vie quotidienne. Les accumulateurs pour les alimenter évoluent, leurs tailles se réduisent, leurs capacités et leurs autonomies augmentent. Le lithium utilisé dans de nombreuses batteries risque de manquer sur Terre, mais de nouvelles technologies n'ayant pas recours à cet élément chimique voient le jour !

Proposition de plan de présentation

1. Fonctionnement d'un accumulateur :
   - lors de la décharge
   - lors de la charge
2. Les différentes technologies employées
3. Les enjeux industriels et environnementaux

Exemple de support de présentation



Décharge d'un accumulateur

Les mots-clés

oxydoréduction ▸ transformation forcée ▸ pile ▸ lithium ▸ charge électrique ▸ électron

QUESTIONS D'APPROFONDISSEMENT POSSIBLES



UN EXEMPLE DE PROJET PROFESSIONNEL

Ordinateurs, lecteurs MP3, téléphones portables, guidages de missiles… l'**ingénieure en électronique numérique** conçoit toute une gamme de produits pour le grand public ou les professionnels. Elle crée les « puces » qui forment les composants de base de l'univers de l'électronique numérique et conçoit des montages électroniques qui serviront à réaliser des circuits imprimés, lesquels constitueront ensuite la base de jeux vidéo, décodeurs, et autres téléphones portables. Elle travaille au sein d'une équipe (bureaux d'études), dans les entreprises en conception électronique. Ce métier s'exerce aussi dans l'industrie automobile, l'aéronautique, l'industrie de l'armement, le secteur médical, etc.



Après le bac : *Bac + 5, diplôme d'ingénieur en électronique ou master 3EA (électronique, énergie électrique, automatique)…*

Autres métiers : *ingénieur(e) systèmes embarqués, ingénieur(e) analogicien(ne), ingénieur(e) électronicien(ne) des systèmes de la sécurité aérienne.*

Avant d'aborder le chapitre EN AUTONOMIE

LES ACQUIS INDISPENSABLES

■ 1re Enseignement de spécialité

■ La **quantité de matière** n d'une espèce chimique est donnée par la relation :

$$n = \frac{m}{M} = \frac{\rho \cdot V}{M}$$

m : masse d'un échantillon (en g) ; ρ : masse volumique de l'espèce chimique (en $g \cdot cm^{-3}$) ; V : volume de l'échantillon (en cm^3) ; M : masse molaire de l'espèce chimique (en $g \cdot mol^{-1}$) ; n (en mol)

■ La **valeur de l'avancement final** d'une transformation chimique est déterminée par les quantités de matière des réactifs à l'état initial du système et par la stœchiométrie de la réaction.

■ Un **protocole de synthèse** se décline en 4 étapes : les conditions de mise en œuvre de la synthèse, les méthodes d'isolement et de purification du produit recherché, et son identification

■ Le **rendement** R d'une synthèse chimique est l'un des indicateurs de son efficacité.

$$R\ (\%) = \frac{n_{obtenue}}{n_{attendue}} \times 100$$

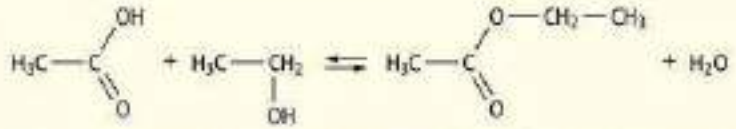
$n_{obtenue}$: quantité de matière de produit obtenue (en mol) ; $n_{attendue}$: quantité de matière de produit attendue (en mol)

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

Pour chaque situation, rédiger une réponse qui explique en quelques lignes le raisonnement.

SITUATION 1

On réalise la synthèse de l'éthanoate d'éthyle selon cette réaction :

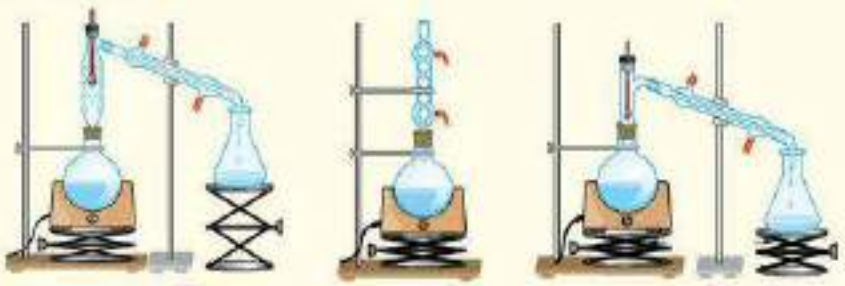


Quel est le rendement de la synthèse si on obtient 5,5 g d'éthanoate d'éthyle à l'issue du chauffage à reflux d'un mélange équimolaire de 0,10 mol d'acide éthanoïque et de 0,10 mol d'éthanol ?

Donnée : *M(éthanoate d'éthyle) = 88 $g \cdot mol^{-1}$.*

SITUATION 2

Pour accélérer une transformation, on peut chauffer le milieu réactionnel à reflux.



montage A montage B montage C

Lequel de ces trois montages convient-il de choisir ?



CHAPITRE

9

CHIMIE

en synthèse organique



À quelles questions le chimiste doit-il répondre pour optimiser une synthèse chimique ?

– EXERCICE 31

NOTIONS ET CONTENUS

- Familles fonctionnelles des esters, amines, amides et halogénoalcanes, et formules topologiques associées.
- Squelettes carbonés insaturés, cycliques.
- Isomérie de constitution.
- Polymères.
- Optimisation de la vitesse de formation d'un produit et du rendement d'une synthèse.
- Stratégie de synthèse conduisant à la modification de groupes caractéristiques ou de chaîne carbonée, ou à une polymérisation.
- Protection/déprotection de fonction.
- Synthèses écoresponsables.

CAPACITÉS EXPÉRIMENTALES

- Mettre en œuvre un protocole de synthèse pour étudier l'influence de la modification des conditions expérimentales sur le rendement ou la vitesse.
  – Activité 2
- Mettre en œuvre un protocole de synthèse conduisant à la modification d'un groupe caractéristique ou d'une chaîne carbonée.
  – Activités 1 et 2

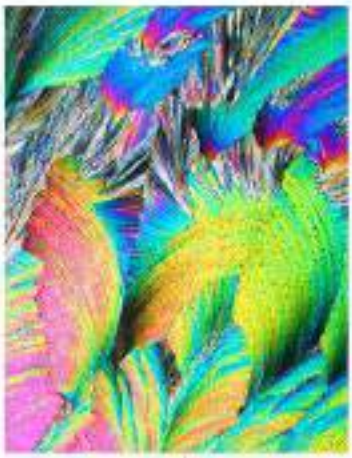
1. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE

TP

COMPÉTENCES :
REA Mettre en œuvre un protocole expérimental
AN/RAI Justifier un protocole

Synthèse de l'acide hippurique

Le métabolisme d'élimination des composés du benzène dans l'organisme conduit à la synthèse de l'acide hippurique éliminé dans les urines.
On se propose de réaliser, au laboratoire, la synthèse de l'acide hippurique.

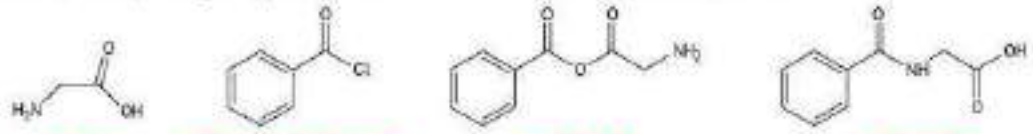


Cristaux d'acide hippurique, observés en microscopie optique (lumière polarisée). ►

PARTIE 1 Étude de la réaction

DOC 1 Réaction de synthèse de l'acide hippurique

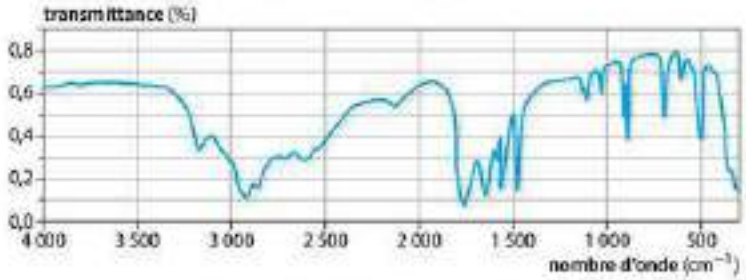
Au laboratoire, on synthétise l'acide hippurique, ou acide benzoylaminoacétique, par réaction de la glycine avec le chlorure de benzoyle.
L'examen de la réactivité des fonctions chimiques portées par chacun des deux réactifs, laisse présager la possibilité de la formation de deux produits, A et B.



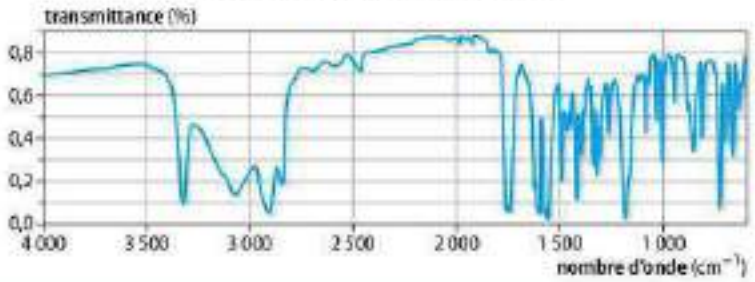
glycine — chlorure de benzoyle — molécule A — molécule B

Néanmoins, l'analyse spectrale infrarouge du produit de synthèse purifié montre qu'une seule espèce chimique s'est réellement formée.

Spectre IR de la glycine



Spectre IR de l'acide hippurique



EXPLOITATION ET ANALYSE

1 Nommer les fonctions chimiques présentes dans la molécule de glycine.

2 a. Pour les molécules A et B possiblement formées, préciser la fonction chimique de la glycine qui n'a pas été modifiée et celle qui a réagi et disparu.
b. Nommer la fonction chimique qui a été formée dans la molécule B.

3 En comparant les spectres IR de la glycine et de l'acide hippurique et en utilisant la table des bandes IR, donnée en rabat v de couverture, déterminer laquelle des molécules A ou B est l'acide hippurique.

4 a. Écrire l'équation de la réaction de synthèse de l'acide hippurique à partir de la glycine et du chlorure de benzoyle
b. Identifier le sous-produit formé.

5 Pour quelle raison peut-on dire que le chlorure de benzoyle est un réactif chimiosélectif ?

PARTIE 2 Synthèse de l'acide hippurique

GESTE ECE n° 4 — Flash PAGE vidéo

DOC 2 Dispositif expérimental



PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

- Dans un ballon bicol de 250 mL, dissoudre 2,5 g de glycine dans 60 mL de soude à 2,0 g · mol^{-1}, volume mesuré à l'éprouvette graduée.
- Équiper le ballon d'un réfrigérant à eau, d'un système d'agitation magnétique et d'une ampoule de coulée isobare (doc. 2).
- Ouvrir la circulation d'eau, puis ajouter goutte à goutte par l'ampoule de coulée 4,5 mL de chlorure de benzoyle de masse volumique 1,21 g · mL^{-1}, tout en agitant vigoureusement.

À la fin de l'addition, maintenir l'agitation pendant 15 min.

- En soulevant le réfrigérant, introduire dans le ballon environ 5 g de glace pilée. Ajouter doucement, par l'ampoule de coulée, 10 mL d'acide chlorhydrique concentré : des cristaux apparaissent.
- Mesurer le pH du milieu réactionnel et poursuivre l'ajout d'acide jusqu'à ce que pH < 4.
- Refroidir le ballon dans un bain d'eau glacée.
- Sous pression réduite, filtrer le produit cristallisé, puis le laver à l'eau glacée. Répéter l'opération de lavage avec 5 mL d'éthoxyéthane.

Récupérer le solide dans un bécher.

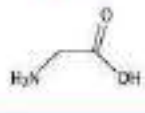
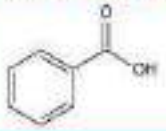
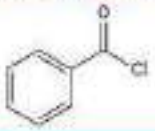
- Recristalliser à l'eau chaude le produit obtenu.

Laisser refroidir à température ambiante, puis dans un bain d'eau glacée.

- Filtrer le produit recristallisé sous pression réduite.
- Sécher à l'étuve réglée à 130 °C.

GESTE ECE n° 6 — Flash PAGE vidéo

DOC 3 Quelques données sur les réactifs et produits

Nom et formule	Glycine	Acide benzoïque	Chlorure de benzoyle	Acide hippurique
				
Masse molaire (en g · mol^{-1})	75,1	122	141	179
Solubilité	• Peu soluble dans l'eau. • Soluble dans les solutions aqueuses basiques.	• Très peu soluble à froid dans l'eau. • Soluble à froid dans l'éthoxyéthane.		• Peu soluble à froid dans l'eau, soluble à chaud. • Très peu soluble dans l'éthoxyéthane.

EXPÉRIENCE ET EXPLOITATION

1 Mettre en œuvre le protocole proposé.

2 Calculer les quantités de matière de chacun des deux réactifs introduits.

3 En supposant la réaction totale, quelle masse d'acide hippurique obtiendra-t-on à l'issue de la synthèse ?

4 Lors de cette synthèse, conduite en milieu basique, se forme en réalité l'ion hippurate.

Écrire l'équation de la réaction acide-base qui conduit à la formation d'acide hippurique par action de l'acide chlorhydrique sur sa base conjuguée.

5 Lors de cette étape, une réaction parasite peut avoir lieu : l'hydrolyse du chlorure de benzoyle en acide benzoïque. Écrire l'équation de cette réaction.

6 En s'aidant du document 3, expliquer pourquoi, lors du lavage des cristaux, on parvient à séparer l'acide hippurique de l'acide benzoïque.

CONCLUSION

7 Calculer le rendement de la synthèse réalisée.

Je réussis si...

- **Je sais mettre en œuvre un protocole.**
- **Je sais calculer un rendement.**
- **Je sais justifier les étapes d'une synthèse organique.**

2. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE

TP

COMPÉTENCES :
(RÉA) Utiliser un modèle
(VAL) Confronter un modèle à des résultats expérimentaux

Synthèses comparées d'une espèce odorante

Le benzoate de méthyle est un des constituants de diverses huiles essentielles d'œillet ou d'ylang-ylang. Comment améliorer le rendement de sa synthèse au laboratoire ?

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

- Dans un ballon, introduire :
  - les réactifs de la synthèse (doc. 1) ;
  - 1 mL d'acide sulfurique concentré qui joue le rôle de catalyseur, à l'aide d'une pipette compte-gouttes ;
  - quelques grains de pierre ponce.
- Chauffer à reflux pendant 60 min (doc. 2).
- Retirer le ballon du montage, le laisser refroidir à l'air libre, puis dans un bain d'eau froide.
- Verser son contenu dans une ampoule à décanter contenant 50 mL d'une solution aqueuse saturée de chlorure de sodium.

Deux phases non miscibles apparaissent.

Agiter, dégazer, puis laisser décanter.

Éliminer la phase aqueuse.

- Laver la phase organique avec une solution d'hydrogénocarbonate de sodium. Agiter tout en dégazant régulièrement jusqu'à ce que l'effervescence cesse.

Éliminer la phase aqueuse.

- Recueillir la phase organique dans un bécher et introduire une pointe de spatule de sulfate de magnésium anhydre.
- Filtrer et recueillir le filtrat dans un erlenmeyer propre et sec.

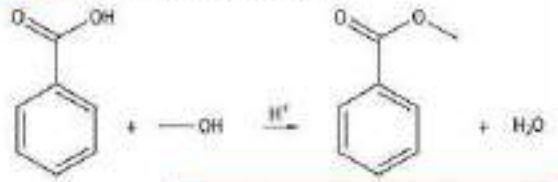
Déterminer la masse d'ester obtenue.

GESTE ECE n° 4

GESTE ECE n° 5

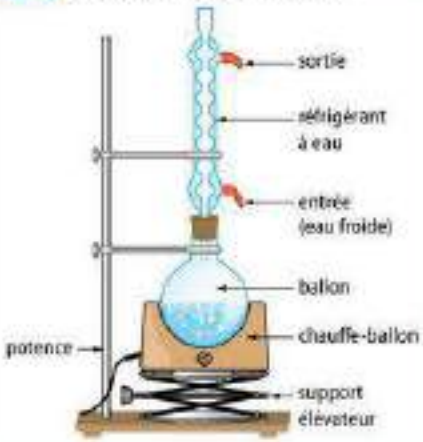
Flash PAGE vidéo

DOC 1 La réaction de synthèse



	Expérience A	Expérience B
Acide benzoïque	12,2 g	12,2 g
Méthanol	4,00 mL	40,0 mL

DOC 2 Dispositif expérimental



DOC 3 Quelques données sur les réactifs et produits

Composés	Acide benzoïque	Méthanol	Benzoate de méthyle
Masse molaire (en $g \cdot mol^{-1}$)	122	32	136
Masse volumique (en $g \cdot mL^{-1}$)	1,3	0,80	1,1
Solubilité dans l'eau salée	Très faible	Forte	Nulle

EXPÉRIENCE ET EXPLOITATION

1 Mettre en œuvre l'expérience A ou l'expérience B.

2 Calculer les quantités de matière de chacun des réactifs introduits.

3 a. Représenter l'ampoule à décanter et les deux phases en présence dont on justifiera les positions.

b. Pour quelle raison introduit-on de l'eau salée ?

c. Quel est le rôle de la solution d'hydrogénocarbonate de sodium introduite ? Écrire l'équation de la réaction acide-base sachant que les couples intervenant sont : CO_2 (aq), H_2O (ℓ) / HCO_3^- (aq) et $C_6H_5CO_2H$ (aq) / $C_6H_5CO_2^-$ (aq).

4 Déterminer le rendement de la synthèse réalisée.

CONCLUSION

5 De l'étude des rendements comparés des expériences A et B, déduire une méthode permettant d'augmenter le rendement de la synthèse réalisée.

Je réussis si...

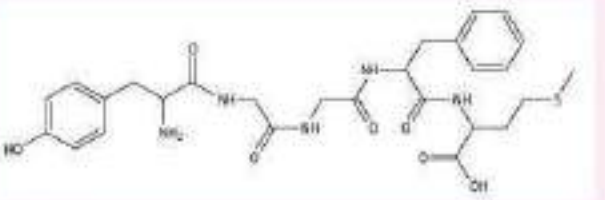
- **Je suis capable de mettre en œuvre un protocole.**
- **Je sais calculer un rendement.**
- **Je sais identifier un paramètre expérimental favorisant le rendement d'une transformation.**

COMPÉTENCES :
(RÉA) Utiliser un modèle
(VAL) Confronter un modèle à des résultats expérimentaux

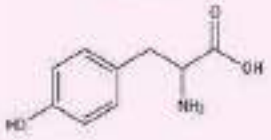
Stratégie de synthèse organique

SITUATION-PROBLÈME

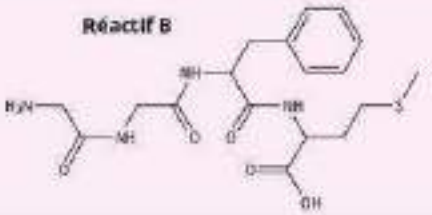
La Met-enképhaline, appelée aussi Tyr-Gly-Gly-Phe-Met, est un petit polypeptide constitué de cinq acides alpha-aminés. Elle fut une des premières endorphines identifiées dans les années 70 et permet de diminuer substantiellement la douleur du fait de son pouvoir analgésique supérieur à celui de la morphine. On envisage ici la dernière étape de sa synthèse à partir des deux réactifs suivants :



Réactif A



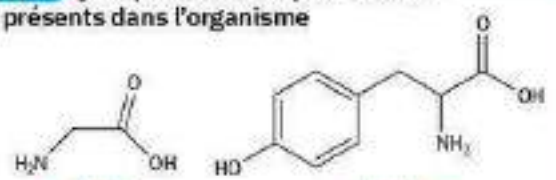
Réactif B



Quelle stratégie mettre en place pour obtenir exclusivement de la Met-enképhaline à partir des réactifs A et B ?

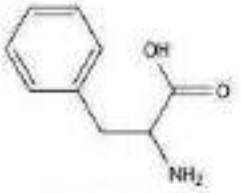
HYPOTHÈSE Proposer une hypothèse en la justifiant.

DOC 1 Quelques acides alpha-aminés présents dans l'organisme



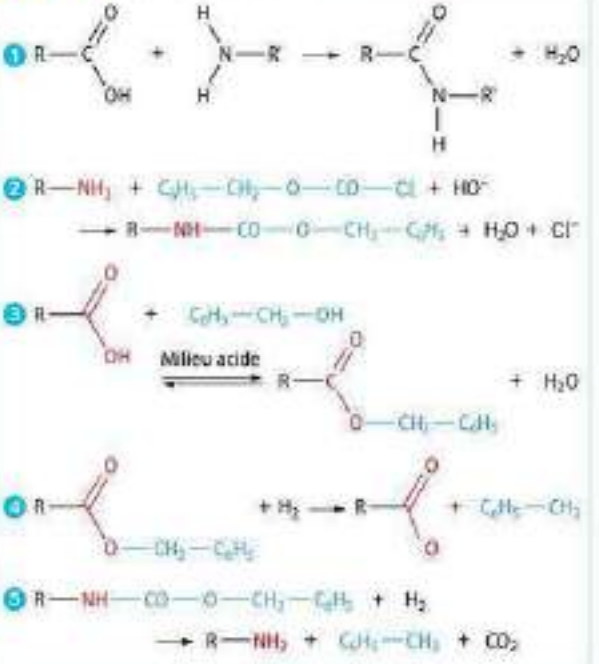
glycine

tyrosine



phénylalanine

DOC 2 Banque de réactions



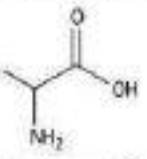
PISTES DE RÉSOLUTION

1 Quels sont les deux groupes caractéristiques portés par les acides alpha-aminés ?

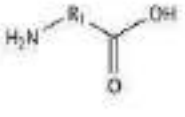
2 La liaison peptidique qui se forme entre deux acides alpha-aminés (doc. 2, réaction ①) est en fait une fonction chimique. Laquelle ?

3 a. Donner la formule des quatre polypeptides qu'il est possible d'obtenir à partir des réactifs A et B, que l'on notera plus simplement ici :

Réactif A



Réactif B



b. Identifier la Met-enképhaline.

CONCLUSION

4 À partir des réactifs A et B, proposer une suite de transformations chimiques à mettre en place afin de réaliser la dernière étape de la synthèse de la Met-enképhaline.

Je réussis si...

- Je sais identifier des étapes de protection/déprotection de fonctions dans une banque de données.
- Je sais justifier l'intérêt de ce type d'étape.
- Je suis capable d'élaborer une séquence réactionnelle de synthèse d'une espèce chimique à partir d'une banque de réactions.

1 Structure et propriétés

Formule topologique

La **formule topologique** est un mode de représentation simplifié des molécules organiques : on ne représente pas les atomes de carbone et d'hydrogène à l'exception de ceux liées à un hétéroatome (O, N, ...). Les **liaisons covalentes** sont représentées par des traits (FIG. 1).

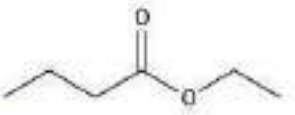


FIG. 1 Formule topologique du butanoate d'éthyle, un arôme à l'odeur fruitée d'ananas.

Familles fonctionnelles

Les composés organiques peuvent être regroupés en différentes **familles ou fonctions chimiques** (FIG. 2) (FICHE MÉTHODE ➥ p. 550).

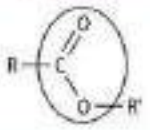
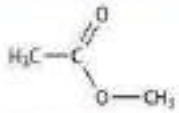
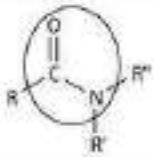
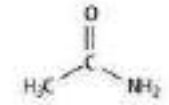
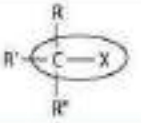
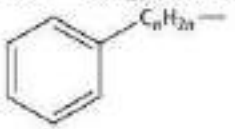
Formule	Nom de la famille	Exemple
	**ester**	 éthanoate de méthyle
	**amine**	H_3C-NH_2 méthanamine
	**amide**	 éthanamide
	**halogéno alcane**	H_3C-Br bromure de méthyle

FIG. 2 Les familles de composés organiques. R, R' et R" désignent l'atome H, des groupes alkyles $-C_nH_{2n+1}$ ou encore :



et X est un halogène.

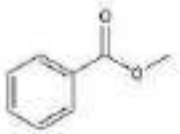
Squelettes carbonés et isomérie de constitution

Les atomes de carbone sont liés les uns aux autres pour former des squelettes carbonés qui peuvent être linéaires, ramifiés ou cycliques.

Un **squelette carboné** saturé ne possède que de simples liaisons C—C. Il est insaturé s'il compte au moins une liaison multiple (double ou triple) entre deux atomes de carbone.

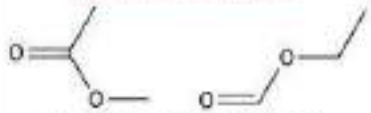
EXEMPLE

Le squelette carboné du benzoate de méthyle, utilisé dans l'industrie des parfums, est cyclique et insaturé.



Des **isomères de constitution** sont des molécules de même formule brute, mais avec un enchaînement d'atomes différent : leurs formules développées ou semi-développées sont différentes (FIG. 3), donc leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques sont différentes.

Isomères de chaînes



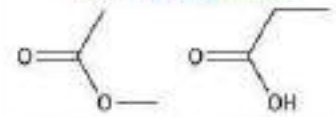
(squelette carboné différent)

Isomères de position



(position différente d'un groupe caractéristique ou d'une insaturation)

Isomères de fonction



(groupes caractéristique différents)

FIG. 3 Isomères de constitution.

Polymères

Les **polymères** sont des macromolécules, répétition d'un motif élémentaire : le monomère (FIG. 4).

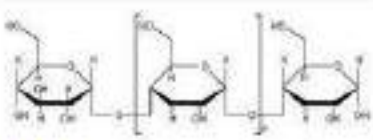


FIG. 4 L'amylose, dont le monomère est la molécule de glucose, est l'un des polymères naturels constitutifs de l'amidon.

2 Optimisation d'une synthèse

Augmenter la vitesse de formation

Un des enjeux lors d'une synthèse chimique peut être d'augmenter la vitesse de formation du produit recherché, il conviendra alors d'agir sur les facteurs cinétiques :
– la température et la concentration des réactifs ;
– l'état de division des réactifs, la nature du solvant (FIG. 5) qui, en favorisant la rencontre entre les espèces qui réagissent, permettent également une diminution du temps de demi-réaction, donc de la durée de la transformation ;
– l'usage d'un catalyseur conduisant à la formation d'intermédiaires réactionnels plus réactifs.

$C_2H_5I + N(C_2H_5)_3 \rightarrow N(C_2H_5)_4^+ + I^-$

Solvant	Vitesse relative à 100 °C
Hexane	1
Benzène	80
Chlorobenzène	332
Acétone	530
Nitrobenzène	2 766

FIG. 5 Influence de la nature du solvant sur la vitesse de formation d'un produit.

Améliorer le rendement

Le **rendement** d'une synthèse chimique est l'un des critères permettant d'apprécier son efficacité. Il est défini par :

$$\text{rendement (\%)} \quad R = \frac{n_{obtenue}}{n_{attendue}} \times 100$$

$n_{obtenue}$: quantité de matière de produit obtenue (en mol)
$n_{attendue}$: quantité de matière de produit attendue (en mol)

Le **choix d'un réactif** plutôt qu'un autre est susceptible d'influencer le rendement d'une synthèse, tout comme celui **d'un catalyseur** plus ou moins **sélectif** (FIG. 6).

Lors d'un équilibre chimique, le **quotient de réaction** dépend des concentrations des réactifs (A et B) et des produits (C et D), il s'écrit :

$$Q_r = \frac{[C]^c \cdot [D]^d}{[A]^a \cdot [B]^b}$$

Quelles que soient les conditions initiales, **un système tend toujours** vers un même état d'équilibre caractérisé par sa **constante d'équilibre K(*T*)** à une température donnée. Ainsi, modifier le quotient de réaction revient également à influencer le sens d'évolution d'un système chimique.

Conformément au critère d'évolution spontanée d'un système hors équilibre chimique, **l'introduction d'un excès d'un réactif** ou **l'élimination d'un produit** (FIG. 7) du milieu réactionnel conduit à **l'augmentation du rendement** d'une synthèse.

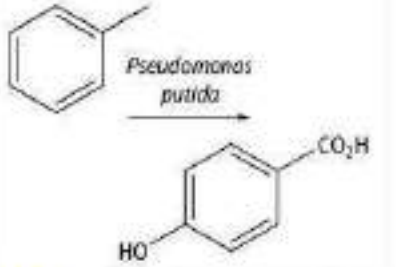


FIG. 6 L'action de *Pseudomonas putida*, un biocatalyseur, sur le toluène, conduit avec une sélectivité de 99 % à la production d'acide para-hydroxybenzoïque, monomère de la préparation des polyesters. C'est une alternative à la voie chimique énergivore et peu sélective.

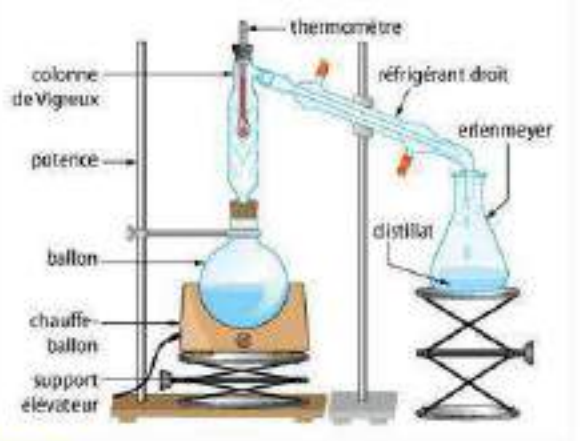


FIG. 7 Le montage de distillation permet d'éliminer un produit au cours de sa formation.

3 Stratégies de synthèse multi-étapes

Modifier la structure d'une molécule

Lors d'une synthèse, la transformation d'une molécule peut concerner l'un de ses groupes caractéristiques et/ou sa chaîne carbonée. On peut classer les réactions à partir de l'examen de la nature des réactifs et des produits.

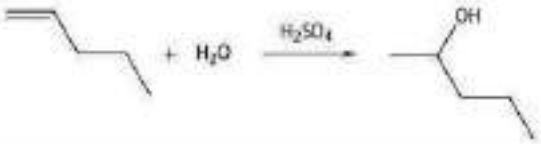
Lors d'une **réaction de substitution**, un atome ou un groupe d'atomes du réactif d'intérêt est **remplacé** par un autre atome ou groupe d'atomes.

EXEMPLE



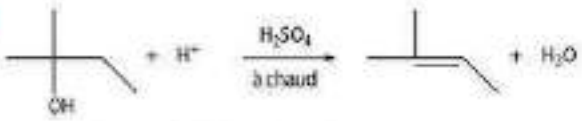
Une **réaction d'addition** implique généralement une molécule contenant au moins une **insaturation** dans sa chaîne carbonée : le produit obtenu contient tous les atomes de tous les réactifs.

EXEMPLE



Lors d'une **réaction d'élimination**, le réactif d'intérêt cède des atomes portés par des carbones adjacents et il apparaît une **insaturation** dans sa chaîne **ou** une **cyclisation** de celle-ci.

EXEMPLE



■ Selon le type de réactif utilisé pour réagir avec un composé organique, on pourra également distinguer les réactions d'oxydo-réduction, des réactions acide-base.

■ Une synthèse peut également conduire à la formation d'un polymère : on parle alors de **polymérisation** (FIG. 8).

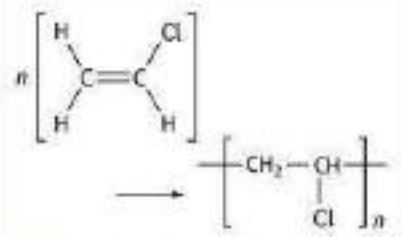


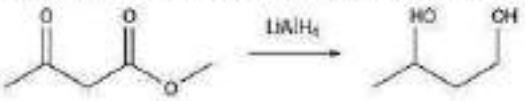
FIG. 8 Synthèse du polychlorure de vinyle (PVC) par polymérisation.

Protection et déprotection de fonction

■ Un réactif est dit **chimiosélectif** s'il ne réagit qu'avec un groupe caractéristique.

EXEMPLE

• Le réducteur $LiAlH_4$ réduit indifféremment les cétones et les esters en alcool :



• Le réducteur $NaBH_4$ réduit les cétones en alcool, sans agir sur les esters :



Ce réducteur est chimiosélectif.

Lorsqu'une molécule possède plusieurs groupes fonctionnels et en l'absence de réactif chimiosélectif, il est nécessaire, au cours d'une synthèse, de **protéger les fonctions** que l'on ne souhaite pas modifier (FIG. 9).

Une étape de déprotection est alors nécessaire après la réaction.

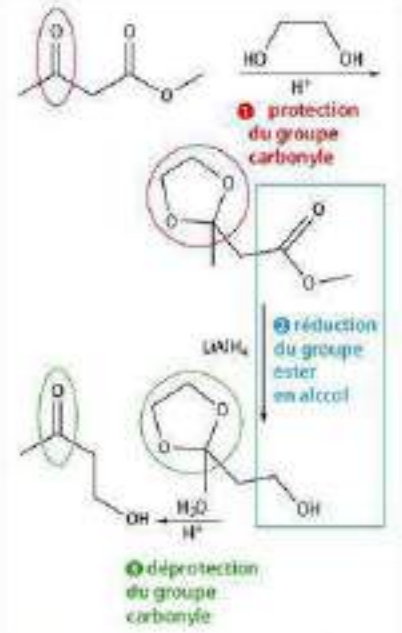


FIG. 9 Utilisation d'un groupe protecteur, puis déprotection.

Synthèses écoresponsables

■ La réalisation des synthèses écoresponsables de composés organiques implique la recherche de réactifs, solvants, catalyseurs et protocoles minimisant les apports d'énergie et les déchets, et augmentant la vitesse, la sélectivité et le rendement. C'est le sens de la « chimie verte » théorisée dans les années 1990 (FIG. 10).

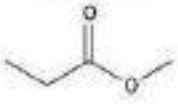


FIG. 10 Quelques principes de la chimie verte.

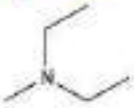
1 Structure et propriétés

- **Formules topologiques des familles chimiques**

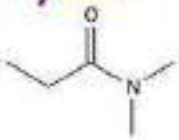
ester



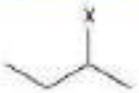
amine



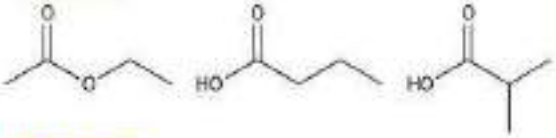
amide



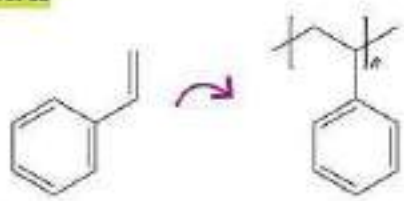
halogénoalcane



- **Isomères de constitution**



- **Polymères**

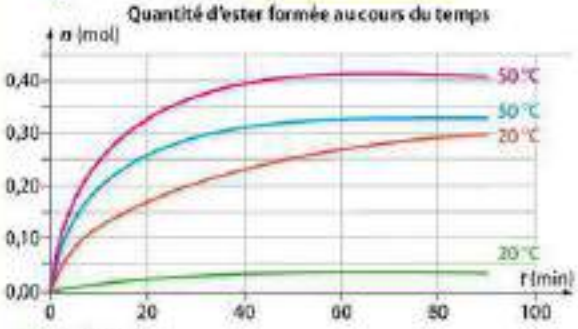


styrène (= monomère) — polystyrène

2 Optimisation d'une synthèse

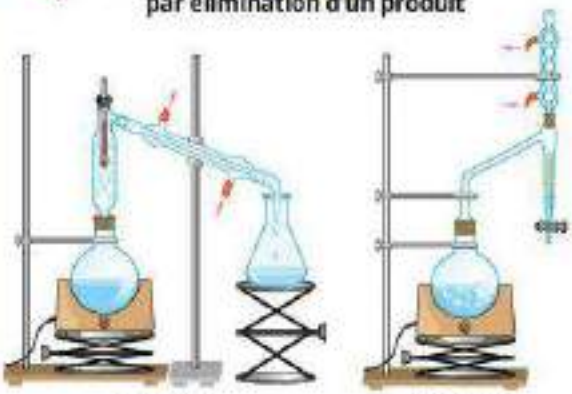
Augmenter la vitesse de réaction

Quantité d'ester formée au cours du temps



— variante 1
— variante 2 : avec ajout d'un catalyseur
— variante 3 : avec ajout d'un catalyseur
— variante 4 : avec ajout d'un catalyseur et un excès d'un réactif

Augmenter le rendement de la synthèse par élimination d'un produit

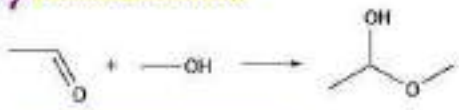


distillation — Dean Starck

3 Stratégies pour une synthèse multi-étapes

- **Modification de la structure d'une molécule**

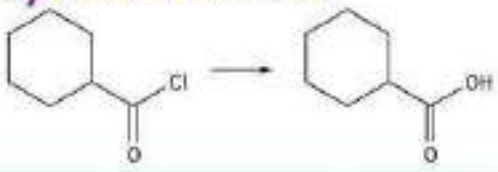
réaction d'addition



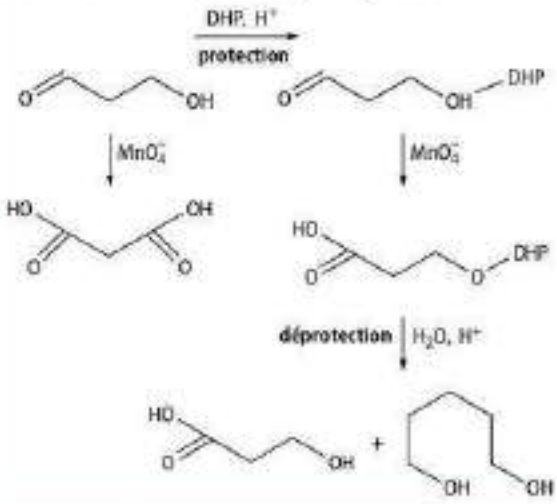
réaction d'élimination



réaction de substitution



- **Protection / déprotection de la fonction alcool par le DiHydroPyranne**



Vérifier l'essentiel

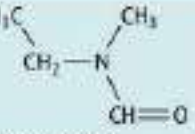
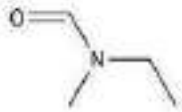
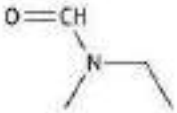
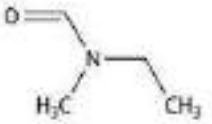
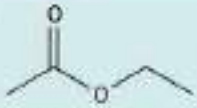
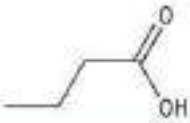
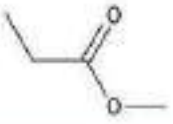
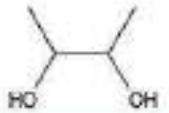
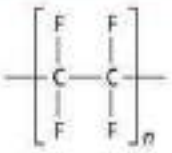
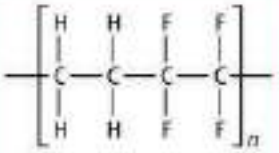
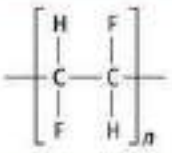
EN AUTONOMIE

Pour chaque question, choisir la ou les bonnes réponses. ➡ SOLUTIONS EN PAGE 593

Flash PAGE corrigés détaillés

Flash PAGE QCM interactifs

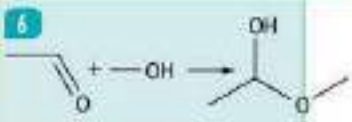
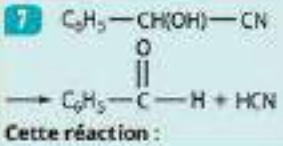
1 Structure et propriétés

	A	B	C
1  **La représentation topologique de cette molécule est :**			
2  **Un isomère de cette molécule est :**			
3  **La molécule est le monomère du téflon® de formule :**			

2 Optimisation d'une synthèse

	A	B	C
4 **Pour augmenter la vitesse de formation d'un produit, il convient :**	d'augmenter la température du milieu réactionnel.	de distiller l'un des produits de la réaction.	d'introduire un catalyseur dans le milieu réactionnel.
5 **Pour améliorer le rendement d'une réaction, il convient :**	de chauffer à reflux le milieu réactionnel.	de distiller l'un des produits de la réaction.	d'augmenter la concentration en quantité de matière de l'un des réactifs.

3 Stratégies pour une synthèse multi-étapes

	A	B	C
6  **Cette réaction est :**	une réaction d'addition.	une réaction d'élimination.	une réaction de substitution.
7  **Cette réaction :**	consiste en une modification de groupe.	consiste en une modification de chaîne.	est une élimination.
8 **Protéger une fonction organique d'une molécule polyfonctionnelle :**	est utile quand le réactif engagé n'est pas chimiosélectif.	est utile quand le réactif engagé est chimiosélectif.	évite que celle-ci forme un polymère.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Acquérir les bases

1 Structure et propriétés

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Exploiter des règles de nomenclature fournies pour nommer une espèce chimique ou représenter l'entité associée.
- Représenter des formules topologiques d'isomères de constitution, à partir d'une formule brute ou semi-développée.
- Identifier le motif d'un polymère à partir de sa formule.
- Citer des polymères naturels et synthétiques et des utilisations courantes des polymères.

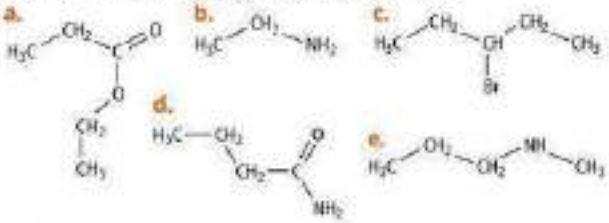
➥ Acquérir les bases : 9 10 11 ➥ S'entraîner : 24 25

DONNÉES

▸ Voir *Nomenclature des molécules* (FICHE MÉTHODE ➥ p. 550).

9 Quelques fonctions organiques

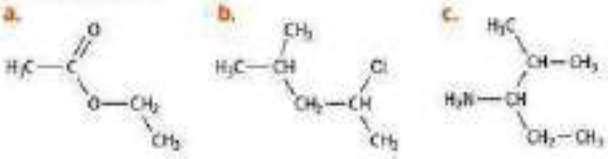
Soient les molécules organiques suivantes :



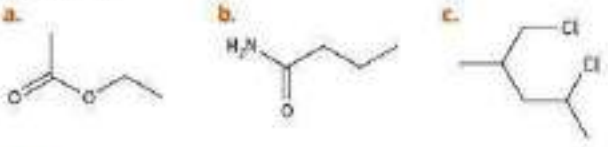
1. Recopier chacune de ces molécules et entourer la fonction organique qu'elles portent.
2. À quelle famille appartient chacune de ces molécules ?
3. Nommer ces molécules.

10 Formule topologique

1. Donner les formules topologiques et nommer les molécules suivantes.



2. Donner les formules semi-développées et nommer ces molécules.



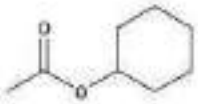
11 Molécules insaturées

Repérer l'insaturation ou les insaturations présente(s) dans les molécules ci-après.



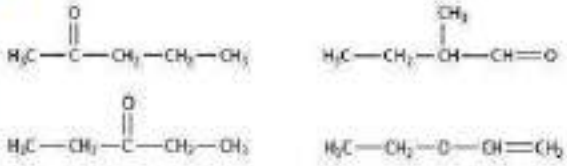
12 Nomenclature

1. Écrire la formule semi-développée et topologique des molécules suivantes.
   a. 1-chloro-2-éthylcyclopentane
   b. 2-fluoro-cyclopentanamine
2. Nommer le composé ci-contre.



13 Relation d'isomérie

1. Parmi les molécules suivantes, lesquelles sont isomères ?



2. Préciser la nature de l'isomérie constatée entre ces molécules.

14 Molécules isomères

Écrire les formules semi-développées de trois isomères correspondant aux formules brutes ci-dessous.

a. C_3H_9N b. $C_4H_8O_2$ c. C_3H_6O

15 Le polychlorure de vinyle

La synthèse du chlorure de vinyle, précurseur du polychlorure de vinyle, se déroule en deux étapes.

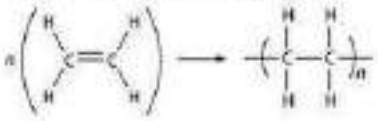
- *On fait réagir du dichlore sur l'éthylène de formule C_2H_4 en phase liquide à 50 °C et sous une pression de 5 atm.*
- *Le composé di-halogéné obtenu est ensuite chauffé autour de 600 °C sous une pression de 25 atm, en présence de catalyseurs métalliques (Ni et Cr). On obtient du chlorure de vinyle, un composé insaturé, et un gaz d'odeur piquante et très soluble dans l'eau où il donne des solutions acides, le chlorure d'hydrogène.*

1. Écrire l'équation de la réaction correspondant à la première étape en utilisant les formules semi-développées des espèces en présence.
2. Nommer le composé di-halogéné obtenu.
3. Écrire l'équation de la réaction correspondant à la seconde étape de synthèse du chlorure de vinyle.

Le PVC, composé des tongs, est un polymère dont le monomère est le chlorure de vinyle.



4. Par analogie avec le schéma de polymérisation de l'éthylène ci-dessous, donner le motif du polychlorure de vinyle.



5. Justifier l'appellation de « polymère » pour ce type de composés.

2 Optimisation d'une synthèse

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Identifier, dans un protocole, les opérations réalisées pour optimiser la vitesse de formation d'un produit.
- Justifier l'augmentation du rendement d'une synthèse par introduction d'un excès d'un réactif ou par élimination d'un produit du milieu réactionnel.

→ Acquérir les bases : 16 → S'entraîner : 22 25 28

16 Synthèse d'un alcool

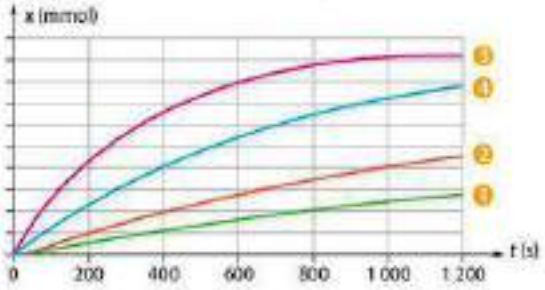
L'hydrolyse du 2-chloro-2-méthylpropane est une réaction lente et totale modélisée par la réaction :



Cette réaction se déroule dans un mélange eau/acétone placé dans un bain thermostaté dans des conditions opératoires (1 à 4) décrites dans ce tableau.

	Eau	Acétone	2-chloro-2-méthylpropane	Température
1	30 g	20 g	1,0 mL	25 °C
2	30 g	20 g	1,0 mL	30 °C
3	30 g	20 g	1,0 mL	40 °C
4	25 g	25 g	1,0 mL	40 °C

L'évolution temporelle de l'avancement de la réaction est obtenue avec une sonde conductimétrique. Voici les résultats :



1. Quels sont les deux paramètres qui influencent la vitesse volumique d'apparition d'un produit ?
2. De quelle façon varie la vitesse volumique d'apparition d'un produit par rapport à chacun de ces paramètres ?

17 Déplacement d'équilibre

On réalise une synthèse organique.



1. Quel(s) dispositif(s) permet(tent) d'améliorer le rendement d'une transformation donnant lieu à un équilibre chimique ?
2. Pour quelle raison et à quelles conditions ?

18 Odeur de banane

L'éthanoate d'isoamyle est un ester à saveur et odeur de banane, utilisé pour aromatiser certains sirops. Il peut être obtenu selon le protocole suivant.

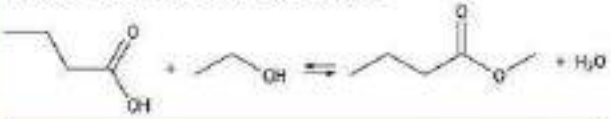
• Dans un ballon de 100 mL, on introduit 17,0 g d'alcool isoamylique et 58 mL d'acide éthanoïque pur.
• On ajoute avec précaution 1 mL d'acide sulfurique concentré et quelques grains de pierre ponce.
• On adapte un réfrigérant à eau et on chauffe à reflux pendant une heure.
• À l'issue de son extraction et de sa purification, on obtient 28,4 mL d'éthanoate d'isoamyle.

1. Quel est le rôle d'un chauffage à reflux ?
2. Pour quelle raison ajoute-t-on au milieu réactionnel 1 mL d'acide sulfurique ?
3. Lorsque l'acide et l'alcool sont introduits dans les proportions stœchiométriques, le rendement de la réaction est de 67 %. Qu'en est-il ici ? Commenter.

Composé	acide éthanoïque	alcool isoamylique	éthanoate d'isoamyle
Masse molaire (en g · mol^{-1})	60	88	130
Masse volumique (en g · L^{-1})	1,05	0,81	0,87

19 L'arôme artificiel d'ananas

Le butanoate d'éthyle est l'un des composants de l'arôme d'ananas. Sa synthèse au laboratoire qui s'effectue selon la réaction suivante est décrite ci-après.



• Dans un ballon, on réalise un mélange équimolaire de 0,22 mol d'éthanol et d'acide butanoïque.
• On ajoute 1 mL d'acide sulfurique concentré et quelques grains de pierre ponce.
• On adapte un réfrigérant à eau et on chauffe à reflux pendant 30 minutes.
• On refroidit ensuite le ballon.
Après avoir isolé le produit recherché, on obtient une masse de 17,4 g de butanoate d'éthyle.

***Donnée :** température d'ébullition du butanoate d'éthyle*
$T_{éb} = 121$ °C.

1. Quel est le rôle de l'acide sulfurique ?
2. Calculer le rendement de la synthèse.
3. On souhaite augmenter la quantité maximale de butanoate d'éthyle produit. Trois propositions sont envisagées. Laquelle ou lesquelles convient-il de retenir ?
   a. Ajouter au 0,22 mol d'acide butanoïque de l'alcool en excès.
   b. Doubler le volume d'acide sulfurique.
   c. Éliminer l'eau produite au cours de sa formation.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

3 Stratégies pour une synthèse multi-étapes

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Modification de groupe caractéristique, de chaîne carbonée

- Élaborer une séquence réactionnelle de synthèse d'une espèce à partir d'une banque.
- Identifier des réactions de substitution, d'addition, d'élimination, d'oxydo-réduction, acide-base.

→ Acquérir les bases : 22 → S'entraîner : 26

Protection / déprotection, synthèses éco-responsables

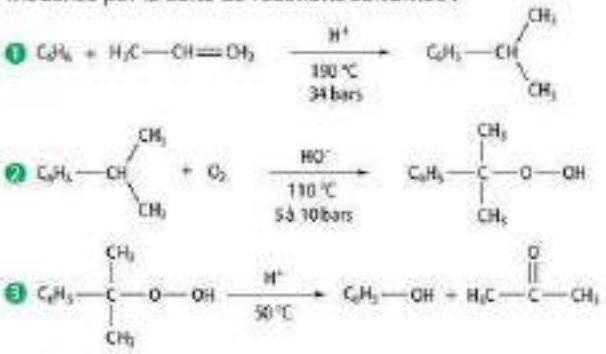
- Identifier des étapes de protection / déprotection.
- Discuter l'impact environnemental d'une synthèse et proposer des améliorations.

→ Acquérir les bases : 23 → S'entraîner : 31

20 Une voie plus verte pour la synthèse du phénol ?

Le phénol est un précurseur de l'industrie chimique (pharmacie, agrochimie, résines, nylon, explosifs...).

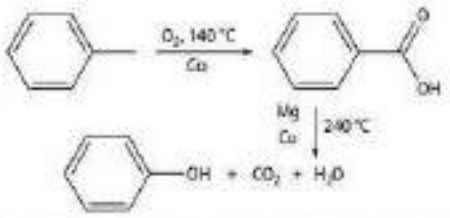
Le procédé HOCK, 90 % de la production mondiale, peut être modélisé par la suite de réactions suivantes :



1. À quelle catégorie de réactions appartiennent les réactions des étapes 1, 2 et 3 de cette synthèse ?

2. Pour une synthèse écoresponsable, quel intérêt une réaction d'addition par rapport à une réaction d'élimination présente-t-elle ?

Le procédé DOW, 5 % de la production mondiale, peut être modélisé par la suite de réactions suivantes.



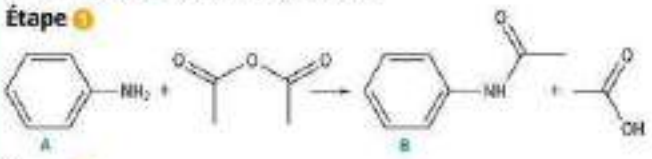
3. Quel intérêt ce procédé présente-t-il dans l'optique d'une synthèse éco-responsable ?

4. Comment expliquer alors sa faible part dans la production mondiale ?

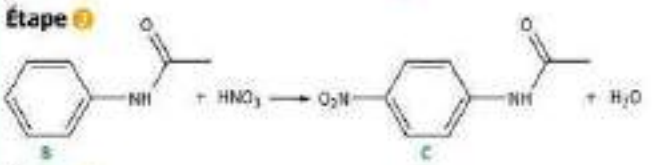
21 Synthèse de la 4-nitroaniline

La 4-nitroaniline (D) est synthétisée par nitration en partant de l'aniline (A), selon ces séquences :

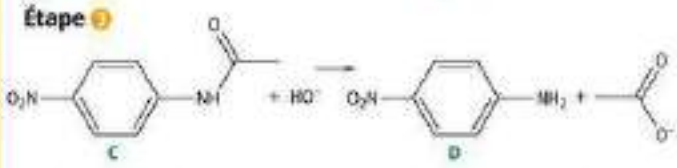
Étape 1



Étape 2



Étape 3



1. À quelle catégorie de réaction les étapes 1, 2 et 3 de cette synthèse appartiennent-elles ?

2. L'acide nitrique HNO_3 est un puissant oxydant, capable de transformer un groupe amine en un groupe nitro $—NO_2$.
a. L'action directe de l'acide nitrique sur l'aniline pourrait-elle conduire à la nitroaniline ? Justifier la réponse.
b. Justifier alors l'étape 1 de la synthèse.
c. L'acide nitrique est-il chimiosélectif ?
d. Quel est le rôle de l'étape 2 ?

Faire le point avant d'aller plus loin

PRÉPA BAC

Pour vérifier ses connaissances, répondre aux questions suivantes (sans regarder le cours !)

- Expliquer comment calculer le rendement d'une synthèse organique.
- Expliquer la nécessité ponctuelle de protéger une fonction organique.
- Définir ce que sont des molécules isomères.
- Citer les grandes catégories de réactions.
- Expliquer comment écrire la formule topologique d'une molécule.
- Schématiser un dispositif expérimental permettant l'augmentation du rendement d'une synthèse.
- Savoir ce qu'est un polymère et expliquer le principe de sa formation.
- Identifier dans un protocole de synthèse les étapes permettant d'accélérer la réaction.

Retrouver ces questions en version numérique Flash PAGE cartes mémos

Exercice résolu EN AUTONOMIE

22 Synthèse et olivier de Bohème

L'olivier de Bohème contient nombre de composés aromatiques dont le benzoate d'éthyle. Sa synthèse, réalisable au laboratoire, est modélisée par la réaction :

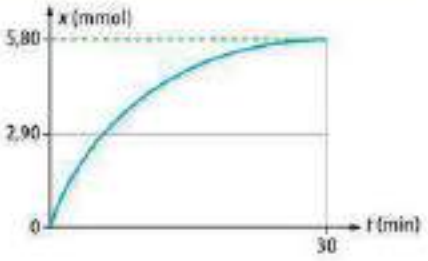
$$C_6H_5CO_2H\,(s) + CH_3CH_2OH\,(\ell) \rightleftarrows C_6H_5CO_2CH_2CH_3\,(\ell) + H_2O\,(\ell)$$

Dans un ballon de 100 mL, on introduit 1,00 g d'acide benzoïque et 10,0 mL d'éthanol. On ajoute une pointe de spatule d'acide paratoluène sulfonique (APTS) et quelques grains de pierre ponce. On porte à reflux pendant 30 min. L'évolution de l'avancement de la réaction est donnée par le graphique ci-après.

Données : *Masse volumique de l'éthanol* $\rho = 0{,}79\ g \cdot mL^{-1}$.

Espèce chimique	*acide benzoïque*	*benzoate d'éthyle*	*éthanol*
Masse molaire (en $g \cdot mol^{-1}$)	122	150	46
Température d'ébullition (en °C)	249	212	78,2

1. **Repérer** les paramètres influençant l'évolution temporelle de cette transformation.
2. **Déterminer** le rendement de la transformation.
3. Augmenter le rendement de cette synthèse en utilisant un montage de distillation à la place d'un chauffage à reflux est-il envisageable ?



LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- Identifier les **quantités des réactifs** introduits.
- Faire le lien entre **avancement de la réaction** et quantité de matière des produits.

LES VERBES D'ACTION

- **Repérer** : identifier grâce à un vocabulaire spécifique ou des termes qui disent la causalité.
- **Déterminer** : mettre en œuvre une stratégie pour trouver un résultat.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. a. Le **chauffage** et l'introduction d'un **catalyseur** (APTS) conduisent à l'augmentation de la vitesse de formation des produits.

2. On note l'acide benzoïque A et l'éthanol E.

$n = \dfrac{m}{M}$ donc $n_A = \dfrac{m_A}{M_A} = \dfrac{1{,}00}{122}$, soit $n_A = 8{,}2 \times 10^{-3}$ mol.

$n = \dfrac{\rho \cdot V}{M}$ donc $n_E = \dfrac{\rho \cdot V_E}{M_E} = \dfrac{0{,}79 \times 10{,}0}{78{,}2}$ soit $n_E = 0{,}10$ mol.

Relativement à la stœchiométrie de la réaction, l'avancement maximal est égal à $8{,}2 \times 10^{-3}$ mol. Le rendement de la transformation est :

$R = \dfrac{n_{obtenue}}{n_{attendue}} \times 100 = \dfrac{5{,}8}{8{,}2} \times 100$ soit $\boldsymbol{R = 71\ \%}$.

3. La température d'ébullition de l'éthanol, un réactif, étant la plus basse, distiller conduirait à son élimination, donc à la diminution du rendement.

QUELQUES CONSEILS

2. S'interroger sur le sens de la valeur lue sur la courbe à l'état final de la transformation.
3. Utiliser le tableau de caractéristiques physico-chimiques.

EXERCICE SIMILAIRE

23 Quelle voie de synthèse pour l'arôme d'abricot ?

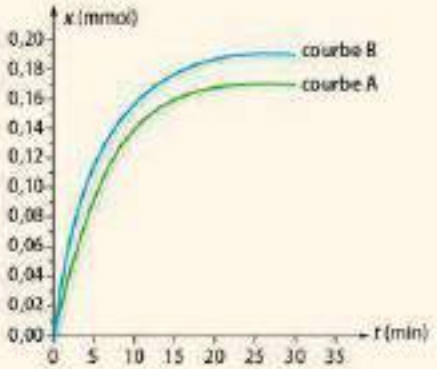
On souhaite préparer l'arôme d'abricot par action de l'acide propanoïque ou de l'anhydride propanoïque sur le 3-méthylbutanol.

On réalise donc deux synthèses dans lesquelles cet alcool est introduit en défaut et en même quantité. Les courbes **A** et **B** ci-contre traduisent respectivement l'évolution de l'avancement chimique des synthèses n° **1** et n° **2** en fonction du temps :

$C_2H_5CO_2H\,(\ell) + (CH_3)_2C_3H_5OH\,(\ell) \rightleftarrows C_2H_5CO_2C_3H_5(CH_3)_2\,(\ell) + H_2O\,(\ell)$ **(1)**

$(C_2H_5CO)_2O\,(\ell) + (CH_3)_2C_3H_5OH\,(\ell) \rightarrow C_6H_5CO_2C_3H_5(CH_3)_2\,(\ell) + C_2H_5CO_2H\,(\ell)$ **(2)**

1. Justifier l'emploi d'un excès d'acide propanoïque pour la voie de synthèse n° **1**.
2. Quel est l'intérêt de l'emploi de l'anhydride propanoïque ?
3. À partir des courbes expérimentales **A** et **B**, déterminer le rendement de la synthèse n° **1**.



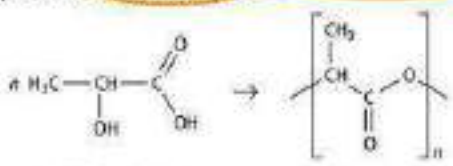
Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Exercice résolu EN AUTONOMIE

24 De l'acide lactique au PLA

L'acide polylactique ou PLA est un polymère entièrement biodégradable utilisé dans l'alimentation pour l'emballage des œufs, et plus récemment, pour remplacer les sacs en plastique jusqu'ici distribués dans les commerces. Il est employé également en chirurgie où les sutures sont réalisées avec des polymères biodégradables qui sont décomposés par réaction avec l'eau ou sous l'action d'enzymes.

Le PLA s'obtient à partir de l'acide lactique :



acide lactique **PLA**

1. Repérer les deux fonctions présentes dans la molécule d'acide lactique.
2. Écrire la réaction entre deux molécules d'acide lactique sachant que les fonctions précédentes réagissent l'une sur l'autre en éliminant une molécule d'eau.
3. Pourquoi parle-t-on de polyester à propos du PLA ?

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

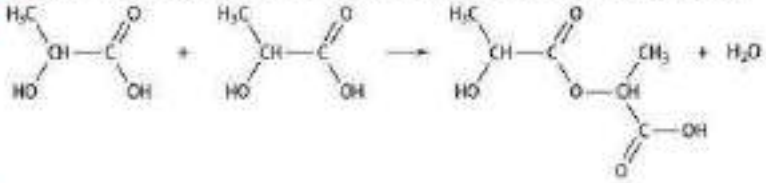
- Identifier l'**acide lactique** comme le monomère du PLA.
- Dans la **nomenclature** officielle, l'acide lactique est l'acide 2-hydroxypropanoïque.

LES VERBES D'ACTION

- Repérer : identifier grâce à un vocabulaire spécifique ou des termes qui disent la causalité.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. a. L'acide lactique contient la fonction carboxyle et la fonction hydroxyle.

2. 

3. Le PLA est un polyester car c'est un polymère qui compte *n* fois la fonction ester.

QUELQUES CONSEILS

3. Identifier la fonction organique obtenue par réaction de la fonction carboxyle sur la fonction hydroxyle.

EXERCICE SIMILAIRE

25 Le PMMA... un polymère vert ?

Le polyméthacrylate de méthyle ou PMMA, découvert en 1880, est un polymère transparent obtenu par polyaddition dont le monomère est le méthacrylate de méthyle ou MMA.

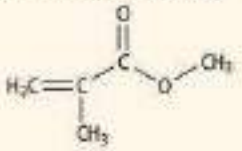
Ce polymère est plus connu sous son premier nom commercial de Plexiglas®.

Le PMMA peut être recyclé facilement par dépolymérisation : par chauffage, celui-ci redonne son monomère de départ. Il peut être alors réutilisé pour une nouvelle polymérisation.

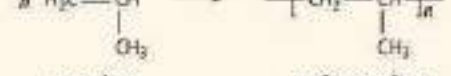
En 2016, les fabricants français du PMMA ont mis en place une filière de recyclage du « verre acrylique ».



Donnée : *formule semi-développée du MMA.*



1. Repérer l'insaturation présente dans la molécule de MMA.
2. Par analogie avec l'équation de polymérisation du propène conduisant au polypropène, écrire l'équation de la réaction de polymérisation qui conduit au PMMA.



propène **polypropène**

3. Le PMMA est-il un polyamide ? un polyester ? une polyoléfine telle le polypropène ?

(Une polyoléfine est un polymère de composés comptant une insaturation.)

4. Du point de vue d'une chimie durable et responsable, quel intérêt présente le PMMA ?

S'entraîner pour maîtriser

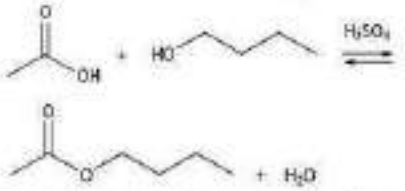
SAVOIR RÉDIGER

26 Proposer une correction de la solution donnée par un élève à l'énoncé.

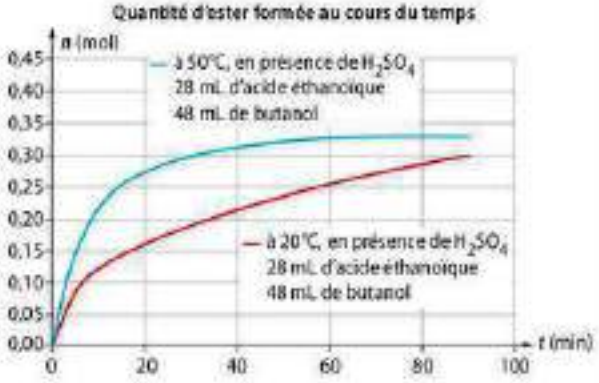
Énoncé

Les esters sont souvent à l'origine de l'arôme naturel des fruits. À côté de leur production naturelle, ils sont synthétisés pour satisfaire les besoins de l'industrie agroalimentaire, de la parfumerie et d'autres secteurs industriels : c'est l'estérification.

On réalise au laboratoire le suivi cinétique de synthèses comparées de l'éthanoate de butyle dont on donne ci-contre les résultats. La réaction de synthèse est :



1. À quelle catégorie de réactions l'estérification appartient-elle ?



2. De quelle(s) façon(s) procède-t-on pour augmenter la vitesse de réaction ?

3. Comment augmenter le rendement de la réaction ?

Solution proposée par un élève

1. L'estérification est une addition : avec deux produits on n'en forme qu'un !) **L'eau n'est-elle pas un autre produit de cette réaction ?**
2. La vitesse de réaction est augmentée en chauffant le milieu réactionnel.) **S'interroger également sur le rôle de l'acide sulfurique introduit.**
3. Chauffer, comme on peut le voir sur les courbes, permet d'augmenter la quantité d'ester formé, donc le rendement.) **Un facteur cinétique influence-t-il l'état final d'une transformation ?**

27 Préparation de l'aniline HISTOIRE DES SCIENCES

En 1826, Otto Unverdorben isole une nouvelle espèce chimique, de formule $C_6H_5NH_2$, par distillation de l'indigo. Celui-ci étant extrait de la plante *Indigofera anil*, le nom d'aniline sera donné à cette nouvelle molécule. En 1856, William Perkin réalise la première synthèse d'un colorant, la mauvéine, à partir d'aniline.

Dès 1865, l'aniline sera utilisée à l'échelle industrielle pour la production de colorants tels que la fuchsine. Aujourd'hui, elle est principalement employée dans la chimie des polymères.

Au laboratoire, on peut préparer l'aniline par action de l'étain Sn sur le nitrobenzène $C_6H_5NO_2$, lui-même obtenu par celle de l'acide nitrique HNO_3 sur le benzène C_6H_6.

- *Dans un ballon, équipé d'une ampoule de coulée, on introduit 22,0 g d'étain en grenaille et 10,0 g de nitrobenzène.*
- *On ajoute lentement 100 mL d'acide chlorhydrique concentré en agitant régulièrement.*
- *On adapte un réfrigérant à eau et on chauffe à reflux pendant 30 minutes.*
- *Lorsque l'addition est terminée, on chauffe à reflux pendant 30 min. Après extraction et purification, on obtient 4,50 g d'aniline.*

Données : $M(C_6H_5NO_2) = 123\ g \cdot mol^{-1}$; $M_{Sn} = 118,7\ g \cdot mol^{-1}$; $M(C_6H_5NH_2) = 93,1\ g \cdot mol^{-1}$.

1. Écrire la formule topologique de l'aniline. Quelle fonction organique porte-t-elle ?

2. a. Écrire l'équation de la réaction de synthèse du nitrobenzène dont l'autre produit est l'eau.

b. À quelle catégorie cette réaction appartient-elle ?

3. Dans le ballon, avant les étapes d'extraction et de purification, on obtient l'ion anilinium $C_6H_5NH_3^+$.

a. Écrire les demi-équations d'oxydoréduction associées aux couples $C_6H_5NO_2$ (aq) / $C_6H_5NH_3^+$ (aq) et Sn^{2+} (aq) / Sn (aq).

b. En déduire l'équation de réaction associée à la transformation dans le ballon.

4. Avant extraction et purification, on ajoute une solution d'hydroxyde de sodium (Na^+ (aq), HO^- (aq)) dans le ballon ; on obtient alors l'aniline. Écrire l'équation de la réaction associée. À quelle catégorie appartient-elle ?

5. Calculer le rendement de la synthèse.

28 Recovery of a greenhouse gas

Polyurethanes are very wide-spread polymers. Urethanes are their corresponding monomers. They were historically prepared from isocyanates, traditionally synthetised through the phosgenation of an amine. Later, a new synthesising process was developed where the phosgene was replaced by carbon dioxide.

$RNH_2 + COCl_2 \rightarrow R{-}N{=}C{=}O + 2\,HCl$

$RNH_2 + CO_2 \rightarrow R{-}N{=}C{=}O + H_2O$



1. What are the reagents at the source of the historic synthesis of polyurethanes?
2. What is the major problem when using one of them?
3. By what other reagent was it later replaced?
4. What is the interest of the second synthesising process in relation to the principles of green chemistry, also known as sustainable chemistry involveing the implementation of principles to reduce and eliminate the use or generation of environmentally harmful substances?

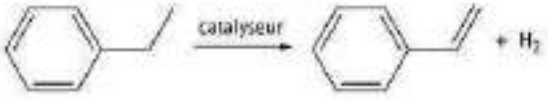
29 Obtention industrielle du styrène

— PARTIE 1

Le styrène, monomère du polystyrène, fut célébré par R. Queneau dans un poème intitulé *Le chant du styrène* dont un extrait est reproduit ci-dessous :

Le styrène est produit en grande quantité
À partir de l'éthylbenzène surchauffé
Faut un catalyseur comme cela se nomme
Oxyde ou bien de zinc ou bien de magnésium

La voie de synthèse évoquée dans ce poème peut être modélisée par la réaction suivante :

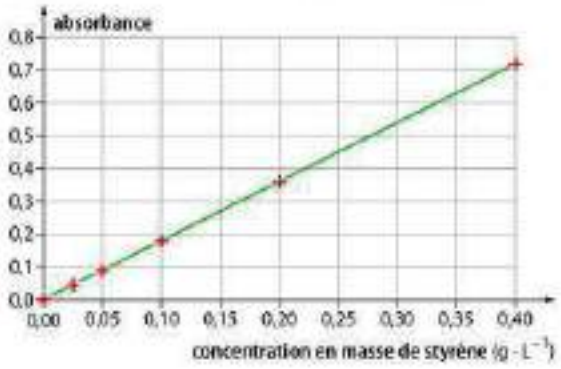


1. Cette réaction correspond-elle à une modification de chaîne ou à une modification de groupe caractéristique ?
2. À quelle catégorie cette réaction appartient-elle ?
3. Dans le cas de la synthèse du styrène, déterminer si la catalyse est homogène, hétérogène ou enzymatique.

— PARTIE 2 DÉMARCHES DIFFÉRENCIÉES

Le styrène est disponible sous la forme d'un liquide dilué dans un solvant. Le produit commercial indique que le pourcentage massique de styrène est de 42 %. Celui-ci, sensible à la lumière et aux températures élevées, peut se polymériser dans la bouteille : il convient donc de vérifier sa concentration avant tout usage.

On prélève une masse $m = 10$ mg du produit commercial étudié que l'on dissout dans un solvant pour former une solution de volume 50,0 mL. La mesure de l'absorbance de l'échantillon obtenu conduit à une valeur de 0,15.



DÉMARCHE EXPERTE

Déterminer si le styrène s'est bien conservé.

DÉMARCHE AVANCÉE

1. Calculer le coefficient directeur de la droite $A = f(c_m)$.
2. En déduire la concentration en masse de styrène dans la solution utilisée.
3. Calculer la masse de styrène présente dans la solution.
4. En déduire le pourcentage massique en styrène de l'échantillon.

30 Ester et cosmétique

On souhaite synthétiser au laboratoire l'éthanoate de benzyle, un additif de nombre de produits cosmétiques.

- *On introduit dans un ballon 28,4 mL d'alcool benzylique et 11,4 mL d'acide éthanoïque par une ampoule de coulée.*
- *On ajoute 3 mL d'acide sulfurique concentré et quelques grains de pierre ponce.*
- *On réalise un montage à reflux et on maintient une ébullition douce pendant une heure. Après extraction de ce dernier, on obtient un volume de 18,9 mL d'ester.*

La synthèse de l'éthanoate de benzyle est modélisée par la réaction d'équation :

$$CH_3CO_2H + C_6H_5CO_2H \rightleftarrows CH_3CO_2CH_2C_6H_5 + H_2O$$

Données :

• Température d'ébullition d'un mélange eau/toluène : 84 °C

Composé	*acide éthanoïque*	*alcool benzylique*	*ester*
Masse molaire *(en g · mol⁻¹)*	60,0	108	150
Masse volumique *(en g · mL⁻¹)*	1,05	1,04	1,06
Température d'ébullition *(en °C)*	11	205	215

1. Parmi les montages suivants, quel est celui qui est utilisé lors de la synthèse ?



2. Justifier le choix dans ce protocole des conditions opératoires suivantes : ajout d'acide sulfurique concentré, chauffage à reflux.
3. Calculer le rendement de la synthèse.
4. Lequel (ou lesquels) des montages présenté(s) ci-dessus permettrait(aient) d'améliorer le rendement de cette synthèse ? Justifier en utilisant les données du tableau.

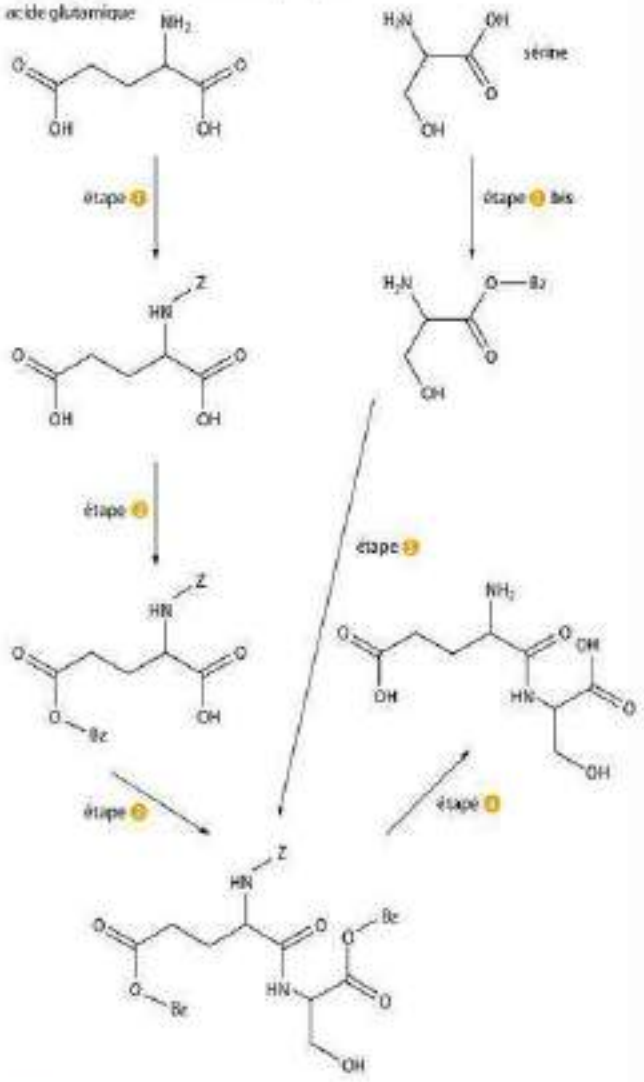
JE VÉRIFIE QUE J'AI...

- traduit en termes de quantités de matière les volumes introduits ;
- tenu compte de la stœchiométrie de la réaction.

31 Umami : la cinquième saveur



En 1973, le biochimiste japonais S. Arai a synthétisé plusieurs dipeptides « umami », dont le dipeptide Glu-Ser. Celui-ci se forme par réaction de l'une des fonctions carboxyle de l'acide glutamique avec la fonction amine de la sérine. Certains groupes d'atomes des deux réactifs doivent donc être momentanément protégés avant de procéder à cette réaction « de couplage ». Une fois le produit de ce couplage réalisé, le chimiste procède alors à la déprotection de ce dipeptide.



1. Recopier la formule chimique du dipeptide Glu-Ser obtenu, entourer et nommer les groupes caractéristiques qu'il contient.

2. Le document fourni présente la succession simplifiée des étapes de la synthèse de ce dipeptide.

a. Recopier les formules de l'acide glutamique et de la sérine, puis entourer sur chacune d'elles la (ou les) fonction(s) chimique(s) nécessitant une protection.

b. Identifier l'étape (ou les étapes) de la synthèse du dipeptide Glu-Ser correspondant à des étapes de protection. Dans chaque cas, préciser quel acide α-aminé est concerné.

c. Identifier l'étape (ou les étapes) de la synthèse du dipeptide Glu-Ser correspondant à des étapes de déprotection.

d. Combien de dipeptides différents aurait-on pu obtenir à partir de l'acide glutamique et de la sérine si l'on n'avait pas eu recours à la protection des groupes caractéristiques ?

Coup de pouce

- Identifier les fonctions chimiques amine et carboxyle des réactifs engagés dans la synthèse.

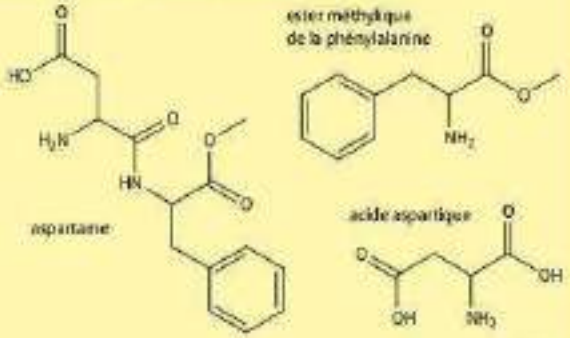
À L'ORAL

32 Quelle voie de synthèse pour l'aspartame ?

L'aspartame est un édulcorant artificiel découvert en 1965. Il a un pouvoir sucrant environ 200 fois supérieur à celui du saccharose.

Ninon et Cléo, chimistes, synthétisent l'aspartame au laboratoire à partir de l'acide aspartique et d'un dérivé de la phénylalanine.

L'analyse du produit obtenu montre en sus de l'aspartame, la présence d'un grand nombre d'espèces chimiques contenant la fonction amide.



Préparer un exposé oral proposant une suite d'étapes réactionnelles pour réussir la synthèse exclusive de l'aspartame.
Ce court exposé devra pouvoir être réalisé sans note écrite.

Les mots-clés à utiliser
- protection de fonction
- déprotection de fonction
- dipeptide

33 RETOUR SUR LA PAGE D'OUVERTURE

En amont de toute synthèse chimique, il convient de s'interroger sur les conditions qui permettent de l'optimiser à tous points de vue.

Préparer un exposé oral rendant compte des divers facteurs sur lesquels le chimiste peut agir.



PRÉPA BAC

Développer ses compétences

34 La synthèse du méthacrylate de méthyle

ANALYSE ET SYNTHÈSE DE DOCUMENTS

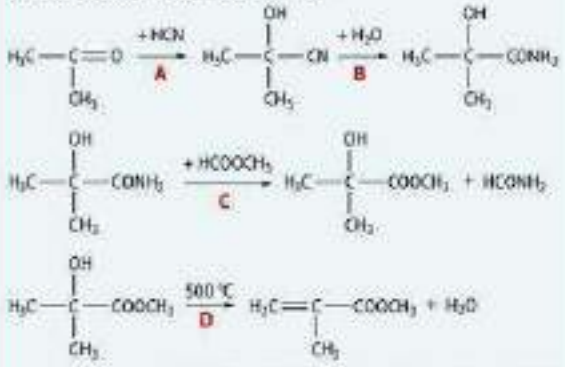
40 min

APP Rechercher et organiser l'information

Le méthacrylate de méthyle, noté MAM, est une espèce chimique employée pour produire le polyméthacrylate de méthyle dont les marques commerciales les plus connues sont l'altuglas™ et le plexiglas™. La plupart des procédés de fabrication du MAM génèrent des inconvénients, les laboratoires recherchent alors des voies alternatives.
Le but de l'exercice est de comparer certains procédés de la synthèse du MAM.

DOC 1 Synthèse du MAM par le procédé MGC

Le procédé de synthèse MGC (Mitsubishi Gas Chemicals) comporte quatre réactions successives et une réaction de régénération du cyanure d'hydrogène à partir du méthanamide formé.



D'après la thèse de Leila ZAIR, Lille 1, 2003

DOC 2 Principes de la chimie verte

- **Prévention** : produire moins de déchets plutôt qu'investir dans leur retraitement.
- **Économie d'atomes** : concevoir les synthèses dans le but de maximiser l'incorporation des matériaux utilisés au cours du procédé dans le produit final.
- **Concevoir des méthodes** pour utiliser et créer des substances faiblement ou non toxiques pour les humains et sans conséquences sur l'environnement.
- **Minimiser les besoins énergétiques** des procédés chimiques.

DOC 3 Économie d'atomes et facteur E

- Lors d'une synthèse organique, l'économie d'atomes E_A quantifie la proportion d'atomes de réactifs incorporés dans le produit désiré par rapport à ceux qui se retrouvent dans des sous-produits indésirables.

Plus sa valeur se rapproche de 100 %, plus le procédé est efficace en termes d'économie d'atomes, donc moins il génère de déchets.

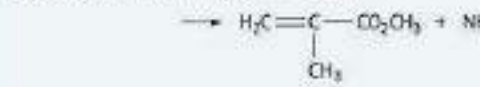
- Le facteur E est défini comme le rapport massique déchet / produit désiré. Il est relié à l'économie d'atomes EA par la relation ci-contre.

Un procédé est d'autant plus efficace que son facteur E est proche de 0.

$$E = \frac{1 - E_A}{E_A}$$

DOC 4 Synthèse du MAM par le procédé ACH

La réaction chimique modélisant le bilan de la synthèse du MAM par le procédé ACH (acétone cyanhydrique) a pour équation :

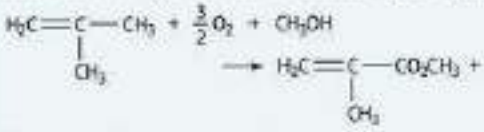


Ce procédé dont le rendement est de l'ordre de 90 % induit, pour chaque tonne de MAM produit, la production de 2,2 t d'hydrogénosulfate d'ammonium.
D'autre part, de nouvelles réglementations imposent aux industriels de bâtir in-situ leurs unités de production de cyanure d'hydrogène éminemment toxique.

D'après la thèse de Leila ZAIR, Lille 1, 2003.

DOC 5 Synthèse du MAM *via* l'isobutène

La réaction chimique correspondant au bilan de la synthèse du MAM par la voie isobutène a pour équation :



Cette synthèse est réalisée en deux étapes.

- L'isobutène est d'abord oxydé en acide carboxylique à une température comprise entre 290 °C et 365 °C avec un rendement de l'ordre de 90 %.
- L'estérification a lieu dans un deuxième temps, entre 280 °C et 306 °C, avec un rendement de 76 % à 80 %.

D'après la thèse d'Hélène Degrand, Lille 1, 2005.

ANALYSE

1. Les économies d'atomes E_A des procédés MGC, ACH et isobutène sont respectivement égales à 69,0 %, 46,5 % et 73,5 %. Calculer le facteur E pour chacun de ces trois procédés de synthèse.
2. À quelle catégorie de réaction appartiennent les réactions A, B et D du procédé MGC ?
3. Discuter de la catégorie de réaction relativement à l'économie d'atomes réalisée.

SYNTHÈSE

Comparer, les trois procédés (ACH, MGC, isobutène) et conclure si l'un d'eux peut être privilégié quant au respect des principes de la chimie verte.

35 Synthèse et titrage de l'acide adipique

RÉSOLUTION DE PROBLÈME

40 min

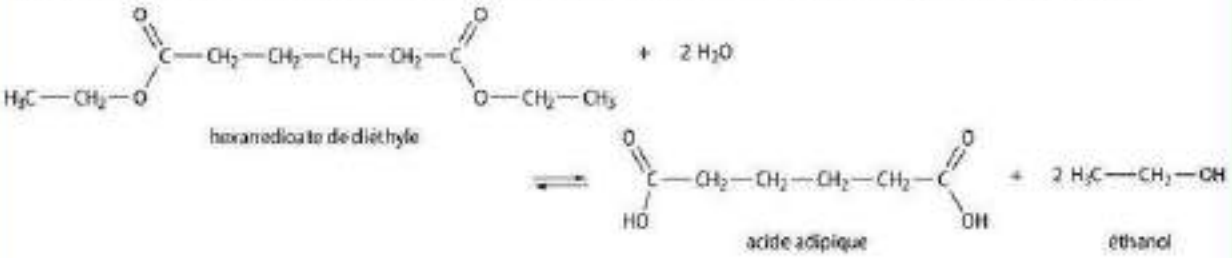
APP Rechercher et organiser l'information

ANA/RAI Proposer une stratégie de résolution

L'acide adipique ou acide hexane-1,6-dioïque est un diacide appartenant à la famille des acides carboxyliques. Il est utilisé principalement pour la fabrication du nylon et, plus généralement, pour la synthèse des polyamides.

Ce diacide peut être obtenu par hydrolyse du diester, l'hexanedioate de diéthyle, en présence d'un catalyseur, l'acide paratoluènesulfonique, noté APTS.

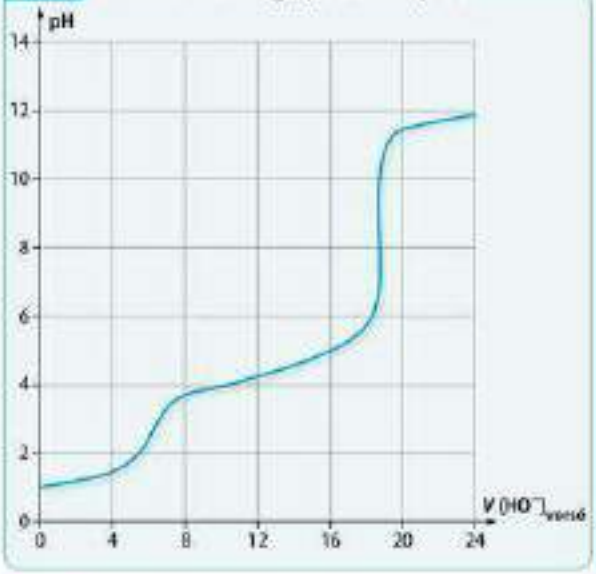
On s'intéresse au rendement de la transformation dont l'équation de réaction est représentée ci-dessous.



DOC 1 Protocole expérimental

- Dans un ballon de 250 mL, introduire 2,0 mL d'hexanedioate de diéthyle à l'aide d'une pipette jaugée.
- Ajouter 40 mL d'eau distillée mesurée à l'éprouvette graduée et quelques grains de pierre ponce.
- Introduire 1,72 g d'APTS.
- Adapter un réfrigérant vertical sur le ballon et chauffer à reflux quarante minutes.
- Laisser refroidir le milieu réactionnel à l'air libre, puis sous un filet d'eau.
- Transvaser le contenu du ballon dans un bécher de 250 mL.
- Titrer l'intégralité du milieu réactionnel par de la soude de concentration en quantité de matière en ions hydroxyde HO^- égale à 1,50 mol · L^{-1}.

DOC 2 Courbe de titrage pH-métrique



DOC 3 Titrage d'un mélange d'acides

L'acide paratoluènesulfonique est un acide fort.

L'acide adipique est un diacide faible.

Ses deux acidités seront titrées simultanément par une base forte.

Lors du titrage d'une solution d'un acide fort et d'un acide faible par une base forte telle la soude, la courbe de suivi pH-métrique laisse apparaître deux sauts de pH.

La première équivalence correspond au titrage de l'acide fort dans la solution, la seconde, à celle de l'acide faible.

DOC 4 Données

- Masses molaires :

$M(\text{diester}) = 202\ g \cdot mol^{-1}$; $M(\text{APTS}) = 172\ g \cdot mol^{-1}$.

- Masse volumique du diester :

$\rho = 1{,}0\ g \cdot mL^{-1}$

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

Quel est le rendement de la réaction de synthèse de l'acide adipique ?

Il est attendu une prise d'initiatives et une présentation de la démarche suivie même s'il elle n'a pas abouti, et de justifier toute réponse.

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Calculer l'avancement maximal de la réaction d'hydrolyse de l'hexanedioate de diéthyle.
2. Écrire l'équation de la réaction entre la soude et l'acide adipique.

36 Synthèse de l'isoprène — RÉSOLUTION DE PROBLÈME

30 min

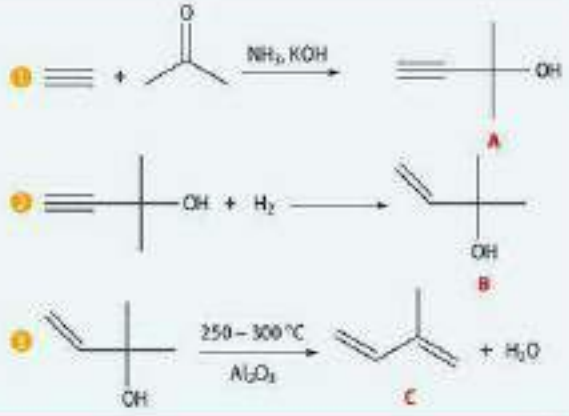
APP Rechercher et organiser l'information ANA/RAI Proposer une stratégie de résolution

L'isoprène a été découvert en 1860 et isolé à partir de la décomposition thermique du caoutchouc naturel. Il est produit et émis dans l'atmosphère par beaucoup d'espèces d'arbres telles que les chênes, peupliers... La production d'isoprène semblerait être un des mécanismes développés par les forêts pour surmonter la surchauffe des feuilles ou une irradiation excessive par le rayonnement ultra-violet.

DOC 1 Étapes de la synthèse de l'isoprène

Le chimiste italien Snamprogetti a développé un processus de synthèse de l'isoprène en trois étapes à partir de propanone et d'éthyne C_2H_2.

- La première étape se déroule sous une pression de 20 bars entre 10 °C et 40 °C dans de l'ammoniac liquide avec comme catalyseur de la potasse, de formule chimique KOH.
- Le produit **A** est ensuite hydrogéné sélectivement pour obtenir **B**.
- Cette espèce chimique **B** est déshydratée à 250-300 °C en présence d'alumine Al_2O_3 sous une pression de 1 bar pour donner de l'isoprène, noté **C**.



DOC 2 Données

- Masses molaires atomiques : $M_C = 12{,}0\ g \cdot mol^{-1}$; $M_H = 1{,}0\ g \cdot mol^{-1}$; $M_O = 16{,}0\ g \cdot mol^{-1}$.
- Masse volumique de la propanone : $\rho = 790\ kg \cdot m^{-3}$.

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Indiquer pour les étapes 2 et 3 la catégorie de la réaction.
2. Déduire de l'ensemble des étapes l'équation de la réaction de synthèse de l'isoprène.

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

Ce processus de synthèse a permis de produire, jusqu'en 1982, 30 000 tonnes d'isoprène par an avec un rendement de 85 %. Quel est le volume minimal de propanone nécessaire à cette production annuelle ?

Il est attendu une prise d'initiatives et une présentation de la démarche suivie même s'il elle n'a pas abouti, et de justifier toute réponse.

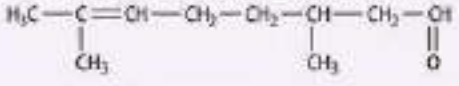
VERS LE SUP'

37 Réflexion autour du citronellal

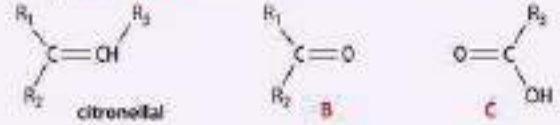
Le citronellal est l'un des arômes de la verveine des Indes ou citronnelle, utilisée comme plante médicinale pour lutter contre la grippe et les maladies pulmonaires. Elle permet également d'éloigner les moustiques.

Le citronellal est un intermédiaire réactionnel de la synthèse du menthol.

Voici la formule semi-développée du citronellal :



1. Le citronellal subit une coupure oxydante par le permanganate de potassium en milieu acide. On obtient deux produits **B** et **C**.



a. Donner le nom et la formule semi-développée du produit **B**.

b. Donner la formule semi-développée du produit **C**.

2. La molécule **C** réagit avec l'hexane-1,6-diamine de formule chimique $NH_2{-}(CH_2)_6{-}NH_2$ pour conduire, après élimination d'eau, à une molécule **D**.

Écrire la réaction de synthèse de la molécule **D**.

3. Une suite de la réaction précédente permet d'obtenir un polymère **P**.

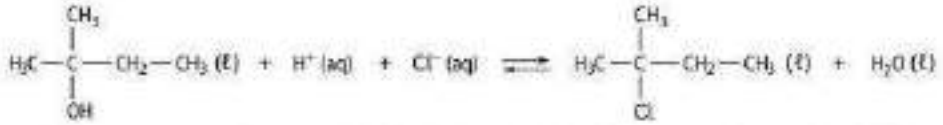
a. Donner la formule semi-développée du motif élémentaire du polymère **P**.

b. Indiquer le nom de la fonction chimique présente dans le polymère **P**.

Substitution ou élimination

Contexte

On obtient les dérivés halogénés par réaction de substitution à partir d'alcools, ainsi le 2-méthylbutan-2-ol réagit avec l'acide chlorhydrique concentré pour produire du 2-chloro-2-méthylbutane selon l'équation :



Un technicien affirme qu'avec le protocole fourni, on n'obtiendra pas seulement le dérivé monochloré, mais un mélange de trois produits organiques. Le but de l'épreuve est de vérifier son affirmation.

Documents mis à disposition

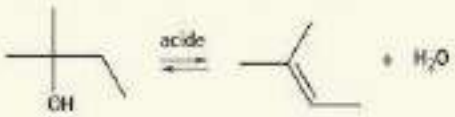
DOC 1 Protocole de synthèse

Dans un erlenmeyer de 250 mL, introduire 25,0 mL de 2-méthyl-butan-2-ol, puis progressivement 40,0 mL d'acide chlorhydrique concentré.

- Adapter un réfrigérant à air et agiter 20 min à l'aide d'un agitateur magnétique.
- Transvaser le milieu réactionnel dans une ampoule à décanter et éliminer la phase aqueuse.
- Ajouter 20 mL de solution concentrée d'hydrogénocarbonate de sodium (ampoule ouverte).
- Évacuer la phase aqueuse, puis recueillir la phase organique dans un bécher sec et la sécher à l'aide de $MgSO_4$ (s) anhydre.
- Filtrer et recueillir le filtrat dans un bécher sec.

DOC 2 Quelle réaction ?

Les réactions de substitution peuvent être concurrencées par des réactions d'élimination. Ainsi, en présence d'un acide fort, le 2-méthylbutan-2-ol peut former majoritairement le 2-méthylbut-2-ène selon une réaction d'équation :



DOC 3 Données

Dérivé halogéné	Densité	Test au nitrate d'argent alcoolique	Test à l'eau de brome (orangée)
2-méthylbutan-2-ol	0,81	négatif	négatif
2-méthylbut-2-ène	0,66	négatif	décoloration
2-chloro-2-méthylbutane	0,81	précipité blanc	négatif

Matériel mis à disposition

- Le matériel et les solutions nécessaires à la mise en œuvre du protocole décrit ci-dessus
- Un flacon étiqueté de nitrate d'argent alcoolique ainsi qu'un flacon étiqueté d'eau de brome

Travail à effectuer

1. (REA) **Mise en œuvre du protocole expérimental proposé** *(30 min conseillées)*

- Mettre en œuvre le protocole proposé

Être en mesure de présenter le filtrat obtenu

2. (VAL) **Exploitation du résultat obtenu** *(20 min conseillées)*

1. Quelles espèces sont susceptibles d'être présentes à la fin de la synthèse dans la phase organique.
2. À partir des documents et du matériel disponible, proposer un protocole expérimental permettant de déterminer si l'affirmation du technicien est avérée.

Être en mesure de présenter le protocole

3. (ANAL) **Proposition de protocole expérimental** *(10 min conseillées)*

- Mettre en œuvre le protocole proposé. Exploiter le résultat, puis conclure quant à l'affirmation du technicien.

Être en mesure de présenter les résultats expérimentaux

Défaire le montage et ranger la paillasse.

PISTE POUR LE GRAND ORAL PRÉPA BAC

Pour se préparer à l'Oral
➥ Livret LES CLÉS DU BAC
(en début de manuel)

UNE QUESTION

Les bioplastiques le sont-ils vraiment ?

Enjeu de la question

Depuis janvier 2017, la loi française interdit les sacs en plastique dits sacs de fruits et légumes, sauf s'ils sont biosourcés et compostables. Nombre de bioplastiques sont alors disqualifiés.

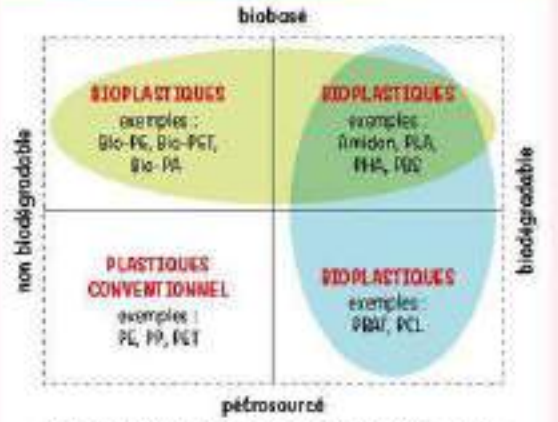
Proposition de plan de présentation

1. Un bioplastique, qu'est-ce que c'est ?
2. Un petit historique des bioplastiques
3. Quelles sont les sources des plastiques biosourcés ?
4. Quelles sont les voies de production des bioplastiques ?

Les mots-clés

biosourcés ▸ développement durable ▸ compostable ▸ biodégradable ▸ biopolymères

Exemple de support de présentation



Des plastiques regroupés sous le préfixe « bio »

QUESTIONS D'APPROFONDISSEMENT POSSIBLES



UN EXEMPLE DE PROJET PROFESSIONNEL

Dès les années 70, le designer V. Papanek dénonçait un design manipulateur de notre vie quotidienne et invitait le designer à se questionner sur nos « besoins réels » et à prendre nos responsabilités.

Dans cette optique, l'**éco-designer** adopte une démarche de conception qui vise à minimiser les impacts sur l'environnement d'un produit tout au long de son cycle de vie.



L'éco-conception est une approche multiple qui intègre une réflexion sur les matières premières utilisées et leur économie, sur les modalités de production par l'utilisation de technologie propre et non écotoxique, par l'usage d'énergies renouvelables, sur la durée de vie des objets et sur leur cycle de vie.

Après le bac : *Bac + 3, Licence professionnelle d'éco-design pour les titulaires d'un BTS Arts appliqués ou encore d'un DUT Génie Mécanique et Productique, Sciences et Génie des Matériaux.*

Autres métiers : *ingénieur(e) chimiste, architecte et décorateur(trice) d'intérieur éco-responsable, responsable atelier titulaire d'un BTS Industries plastiques...*

EXERCICES DE SYNTHÈSE — PRÉPA BAC

Exercice résolu — EN AUTONOMIE

30 min

1 L'aspirine



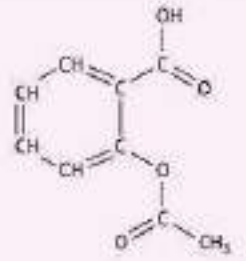
L'aspirine, ou acide acétylsalicylique, peut être obtenue par action de l'acide éthanoïque (ou acétique) CH_3CO_2H sur le groupe hydroxyle —OH de l'acide salicylique.

Si l'on note l'acide salicylique ROH, l'équation de réaction peut s'écrire :

$$CH_3CO_2H + ROH \rightleftarrows CH_3CO_2R + H_2O$$

On considère la transformation effectuée à partir d'un mélange initial de 0,10 mol d'acide éthanoïque et de 0,10 mol d'acide salicylique.

DOC 1 Formule semi-développée de l'aspirine



DOC 2 Indications sur le flacon d'acide éthanoïque

L'étiquette du flacon d'acide éthanoïque du commerce, utilisé pour la synthèse, montre ces pictogrammes :



$w = 80\ \%$ $d = 1,04$ $M = 60\ g \cdot mol^{-1}$

w : titre massique ; d : densité ; M : masse molaire.

1. Nommer les deux groupes fonctionnels que contient l'aspirine.

2. Quelles précautions doit-on prendre pour manipuler l'acide éthanoïque ?

3. Déterminer la concentration en quantité de matière de sa solution commerciale.

Donnée : $\rho_{eau} = 1,00 \times 10^3\ g \cdot L^{-1}$.

4. a. Exprimer le quotient de réaction Q_r en fonction de l'avancement x de la réaction sachant qu'ici l'eau H_2O ne joue pas le rôle de solvant. On pourra s'aider d'un tableau d'avancement de la réaction.

b. En déduire l'expression de la constante d'équilibre associée à l'équation de la réaction $K(T)$.

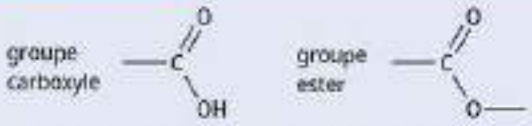
5. Calculer la valeur du quotient de réaction $Q_{r,i}$ à l'état initial.

6. Sachant que la constante d'équilibre $K(T) = 7,0 \times 10^{-3}$ à la température de l'expérience, préciser le sens d'évolution de la transformation, puis calculer la valeur de l'avancement final x_f.

7. Calculer le taux d'avancement final τ de la transformation. Montrer qu'il est inférieur à 8 %.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1.



2. Il faut manipuler sous la hotte, porter une blouse, des lunettes et des gants.

3. 1,00 L de solution contient une masse de soluté :

$m_{soluté} = m_{solution} \cdot w = \rho \cdot V \cdot w = \rho_{eau} \cdot d \cdot V \cdot w$

$m_{soluté} = 1,00 \times 10^3 \times 1,04 \times 1,00 \times 0,80 = 0,83 \times 10^3\ g$

$m_{soluté} = 0,83\ kg$

Sa concentration en quantité de matière est :

$$c = \frac{m_{soluté}}{M \cdot V} = \frac{0,83 \times 10^3}{60,0 \times 1,00} \text{ soit } c = 14\ mol \cdot L^{-1}.$$

4. a. $$Q_r = \frac{\frac{x}{V} \cdot \frac{x}{V}}{\left(\frac{0,10 - x}{V}\right) \cdot \left(\frac{0,10 - x}{V}\right)} = \left(\frac{x}{0,10 - x}\right)^2$$

b. $$K(T) = \left(\frac{x_f}{0,10 - x_f}\right)^2.$$

5. À l'état initial, $x = 0$ donc $Q_{r,i} = 0$.

6. $Q_{r,i} < K$, d'après le critère d'évolution spontanée, la transformation évolue dans le sens direct.

À partir de la réponse 4 b., on écrit :

$$\frac{x_f}{0,10 - x_f} = \sqrt{K} \text{ d'où } x_f = \frac{0,10\sqrt{K}}{1 + \sqrt{K}}.$$

$$x_f = \frac{0,10\sqrt{7,0 \times 10^{-3}}}{1 + \sqrt{7,0 \times 10^{-3}}} \text{ soit } x_f = 7,7 \times 10^{-3}\ mol.$$

7. Le taux d'avancement final est défini par

$\tau = \frac{x_f}{x_{max}}$ avec $x_{max} = 0,10$ mol, donc :

$$\tau = \frac{7 \times 10^{-3}}{0,10} = 7,7 \times 10^{-2} \text{ soit } \tau = 7,7\ \% < 8,0\ \%.$$

À la date de publication de ce manuel, les notions mobilisées pour cet exercice sont exclues de l'épreuve écrite.

Exercice guidé EN AUTONOMIE

THÈME 1

30 min

2 Une potion radioactive

Au début du XX^{e} siècle, le Radithor, une sorte de « potion magique », était censé soigner plus d'une centaine de maladies.

Un cancérologue américain a trouvé chez un antiquaire plusieurs bouteilles de Radithor. Bien que vidées depuis 10 ans de leur contenu, les bouteilles se sont avérées être encore dangereusement radioactives.

On supposera que l'activité radioactive d'un flacon, estimée à $3{,}7 \times 10^{6}$ Bq, est uniquement due à la présence de l'isotope 226 du radium.

L'activité $A(t)$ d'un échantillon de noyaux de radium 226 suit la loi de décroissance exponentielle $A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$ avec A_0 l'activité de l'échantillon à l'instant $t = 0$ s.



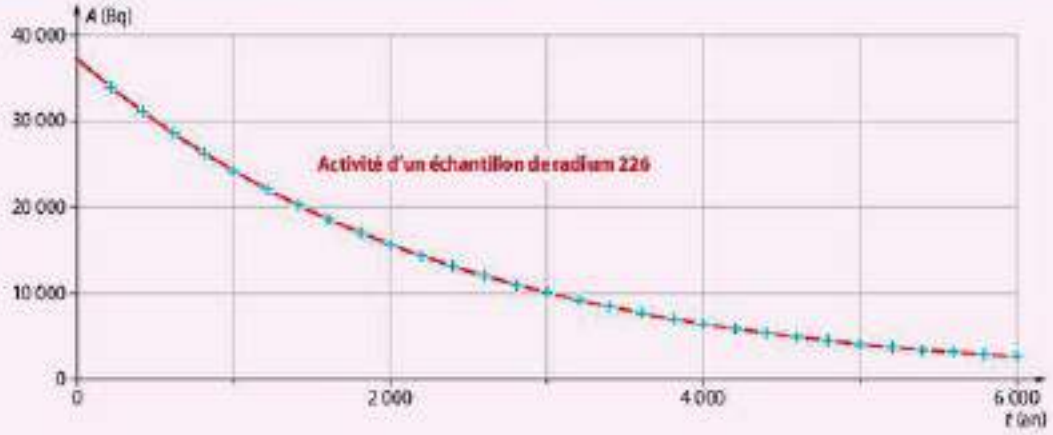
DOC 1 Données

- Symboles de noyaux :

Noyau	radium 226	radium 228	actinium 228	radon 222	hélium 4
Symbole	$^{226}_{88}Ra$	$^{228}_{88}Ra$	$^{228}_{89}Ac$	$^{222}_{86}Rn$	$^{4}_{2}He$

- Constante d'Avogadro : $N_A = 6{,}02 \times 10^{23}\ mol^{-1}$.
- Masse molaire du radium $^{226}_{88}Ra$: $M = 226\ g \cdot mol^{-1}$.

DOC 2 Courbe représentant l'activité au cours du temps



1. L'isotope 226 du radium se désintègre spontanément selon l'équation suivante :

$$^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{88}Rn + {}^{A}_{Z}X$$

Recopier et compléter l'équation de désintégration, puis identifier X. De quel type de radioactivité s'agit-il ?

Coups de pouce

Lors d'une réaction nucléaire, il y a conservation du nombre de nucléons et de la charge électrique.

2. Rappeler la définition du temps de demi-vie $t_{1/2}$ d'un échantillon radioactif. Vérifier que pour le radium 226, $t_{1/2}$ est égal à $1{,}60 \times 10^{3}$ ans.

3. Établir la relation entre le temps de demi-vie et la constante radioactive λ, puis calculer la valeur de λ en s^{-1}.

Se rappeler que l'activité suit la même loi de décroissance que le nombre de noyaux radioactifs et se placer à $t = t_{1/2}$.

4. Calculer N_0 le nombre de noyaux de radium 226 initialement présents dans le flacon de Radithor.

5. Vérifier que le flacon contenait alors une masse $m_0 = 1{,}0$ µg de radium 226.

Utiliser la relation liant l'activité $A(t)$ d'un échantillon radioactif au nombre $N(t)$ de noyaux radioactifs présents.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

PRÉPA BAC

50 min

3 Un composant du lait

L'acide caprique est un acide gras saturé de longueur de chaîne moyenne, présent en petites quantités dans le lait de vache et le lait de chèvre.

100 mL de lait de vache contiennent environ 0,09 g d'acide caprique (sous ses différentes formes acide-base).

Cet exercice propose d'étudier la structure et les propriétés acido-basiques de l'acide caprique et de vérifier, par un titrage, que le lait de chèvre en contient environ trois fois plus que le lait de vache.



DOC 1 Données

- Représentation de la molécule d'acide caprique :



- La conductivité σ d'une solution ionique peut s'exprimer en fonction :
  - de la concentration en quantité de matière $[X_i]$ des ions dans la solution ;
  - des conductivités molaires ioniques λ_i de chaque ion X_i ;

selon la relation :

$$\sigma = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \cdot [X_i]$$

conductivité (en $S \cdot m^{-1}$) ; concentration (en $mol \cdot m^{-3}$) ; conductivité molaire ionique de l'ion i (en $S \cdot m^2 \cdot mol^{-1}$)

- Masses molaires atomiques (en $g \cdot mol^{-1}$) :

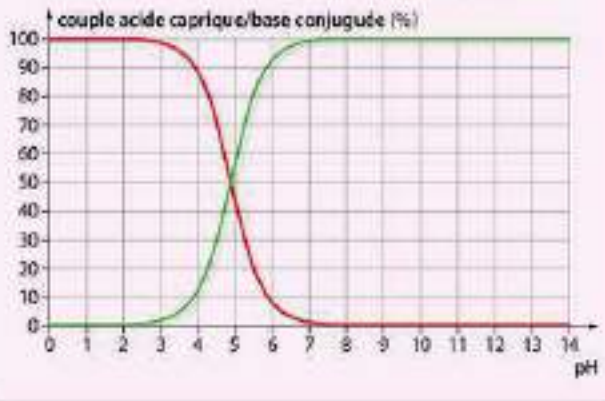
Hydrogène	Carbone	Oxygène
1,0	12,0	16,0

- Conductivités molaires ioniques (en $mS \cdot m^2 \cdot mol^{-1}$) à 25 °C :

Ion	H_3O^+	Cl^-	Na^+	HO^-	RCO_2^-
λ_{ion}	34,96	7,63	5,01	19,8	< 4

- $pH = pK_A + \log \dfrac{[A^-(aq)]_f}{[AH(aq)]_f}$

DOC 2 Diagramme de distribution à 25 °C



DOC 3 Approche du diagramme de distribution d'un couple A/B par Python

```
1 import matplotlib.pyplot as plt
2 import numpy as np
3 pKA = float(input('pKA = '))
4 def a(pH) :
5     return 100*(10**(-pH))/
  ((10**(-pH))+10**(-pKA))
6 def b(pH) :
7     return 100*(10**(-pKA))/
  ((10**(-pH))+10**(-pKA))
8 pH=np.linspace(0, 14, 100)
9 plt.plot(pH,a(pH),'r')
10
11 plt.xlabel('pH')
12
13 plt.show()
```

Partie A Structure et propriétés acide-base de l'acide caprique

1. a. Comment appelle-t-on la représentation de l'acide caprique donnée (doc. 1) ?
b. Recopier la molécule et entourer la chaîne de longueur moyenne, évoquée dans le texte introductif.

2. Vérifier que la masse molaire de l'acide caprique a pour valeur 172 g · mol^{-1}.

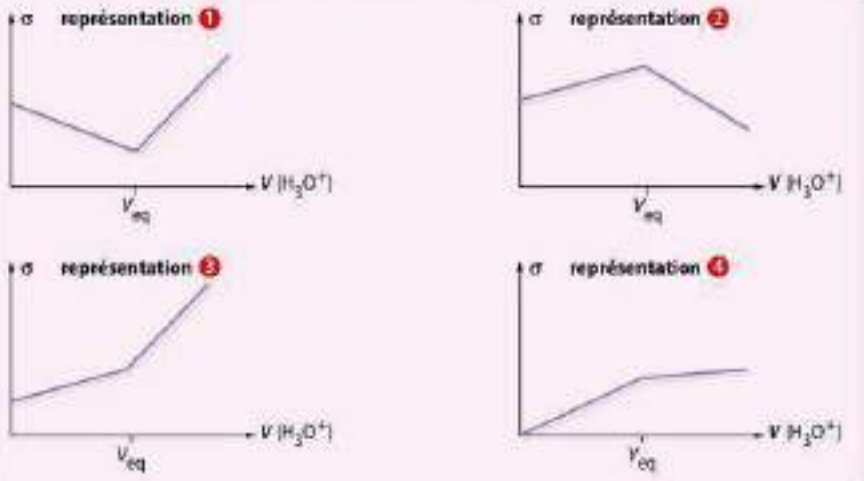
Par souci de simplification, l'acide caprique sera noté RCO_2H dans la suite de l'exercice.

3. a. Définir un acide au sens de la théorie de Brønsted.
b. Justifier que l'acide caprique possède des propriétés acide-base.
c. Donner le couple acide-base auquel il appartient.

4. Le diagramme (doc. 2) a été obtenu à l'aide d'un programme en langage Python (doc. 3).
a. Que permet l'instruction écrite en ligne 3 du programme ?
b. Écrire les deux instructions manquantes en lignes 10 et 12.

5. Un producteur de lait souhaite connaître sous quelle forme, acide ou basique, est présent l'acide caprique dans le lait de chèvre. Une mesure du pH de ce lait indique la valeur 6,0.
a. Identifier sur le document 2 la courbe correspondant à l'acide caprique et celle correspondant à l'autre forme du couple, puis déterminer la valeur du pK_A de ce couple en explicitant la démarche adoptée.
b. En déduire la forme acide-base de l'acide caprique présente majoritairement dans le lait de chèvre.
c. Une espèce chimique est considérée comme négligeable par rapport à une autre si sa concentration en quantité de matière est au moins 100 fois inférieure à l'autre. Dans le cas du lait de chèvre, peut-on négliger une des formes acide-base de l'acide caprique par rapport à l'autre ? Justifier la réponse.

DOC 4 Différents suivis conductimétriques



Partie B Titrage de l'acide caprique contenu dans le lait de chèvre

L'acide caprique contenu dans le lait de chèvre et sa base conjuguée ont été extraits afin de reconstituer une solution aqueuse notée S de même pH que le lait de chèvre.

Il est possible de réaliser le titrage de l'espèce majoritaire contenue dans 10,0 mL de solution S par une solution titrante de concentration en quantité de matière égale à $1{,}00 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.

Les deux solutions titrantes disponibles sont :
– solution d'acide chlorhydrique (H_3O^+ (aq), Cl^- (aq)) ;
– solution aqueuse d'hydroxyde de sodium (Na^+ (aq), HO^- (aq)).

1. a. Choisir la solution titrante et justifier la réponse.
b. Établir l'équation de la réaction support du titrage.

2. Définir l'équivalence d'un titrage et donner à ce moment la relation entre les quantités de matière des espèces chimiques mises en jeu.

3. Quel graphique (doc. 4) représente au mieux le suivi conductimétrique de l'espèce prédominante contenue dans le lait de chèvre ? Justifier la réponse en dressant un bilan de l'évolution des espèces ioniques au cours du titrage.

4. Lors du titrage, le volume de solution titrante versé à l'équivalence est $V_E = 14{,}1$ mL.

Le lait de chèvre contient-il bien trois fois plus d'acide caprique (sous ses différentes formes acide-base) que le lait de vache ?

50 min

4 Espèce fluorescente

La fluorescéine est obtenue par dissolution dans l'eau de fluorescinate de sodium, solide de couleur rougeâtre.

La fluorescéine a été découverte et synthétisée en 1871 par Adolf von Baeyer, chimiste allemand, à partir de résorcine et d'anhydride phtalique. Il s'agit de la première synthèse d'une molécule fluorescente.

La fluorescéine est connue pour émettre une lumière « vert-fluo » quand elle est éclairée en lumière blanche ou en lumière ultraviolette.

Ses applications sont nombreuses : traçage de cours d'eau souterrains, détection de fuites de liquides, angiographie de l'œil.

En 2008, les deux chercheurs américains M. Chalfie et R.Y. Tsien ont reçu le prix Nobel de chimie pour la découverte de la GFP (Green Fluorescent Protein) à partir de l'étude d'une méduse bioluminescente.



DOC 1 Diagramme de prédominance des différentes formes acide-base de la fluorescéine



Source : Chem. Ber. 91 572-580.1958

DOC 2 Données

- Produit ionique de l'eau à 25 °C : $K_e = 1{,}0 \times 10^{-14}$.
- Couples acide-base de l'eau : H_3O^+ / H_2O et H_2O / HO^-.
- Paramètres physico-chimiques :

Nom	Formule brute	Masse molaire (en g·mol^{-1})	Température de changement d'état	Solubilité dans l'eau (en g·L^{-1})	Pictogramme de sécurité
Résorcine	$C_6H_6O_2$	110	$T_f = 110$ °C $T_{éb} = 280$ °C	1 400	
Anhydride phtalique	$C_8H_4O_3$	148	$T_f = 131$ °C $T_{éb} = 284$ °C	$6{,}2 \times 10^{-3}$	
Forme H_2Flu de la fluorescéine	$C_{20}H_{12}O_5$	332	$T_f = 315$ °C	peu soluble	
Fluorescinate de sodium $FluNa_2$	$C_{20}H_{10}O_5Na_2$	376	-	600	
Acide sulfurique	H_2SO_4	98	-	miscible avec l'eau	

Partie A Propriétés acide-base de la fluorescéine

On réalise une solution aqueuse S_0 en dissolvant $1{,}00 \times 10^{-2}$ g de fluorescinate de sodium $FluNa_2$ dans 100 mL d'eau déminéralisée.

1. a. Identifier les différents couples acide-base associés à la fluorescéine.
b. Estimer leur valeur de pK_A.

2. a. Écrire l'équation de la réaction de dissolution du fluorescinate de sodium en ions Flu^{2-} et Na^+ dans l'eau.
b. En déduire la concentration en quantité de matière apportée d'ions fluorescinate $[Flu^{2-}]_0$.

3. Lors de la dissolution, les ions Flu^{2-} réagissent avec l'eau.
a. Écrire l'équation de la réaction qui conduit à un équilibre chimique.
b. De quel type de réaction s'agit-il ?

4. Justifier la relation suivante :

$$[Flu^{2-}]_f = [Flu^{2-}]_0 - [HFlu^-]_f$$

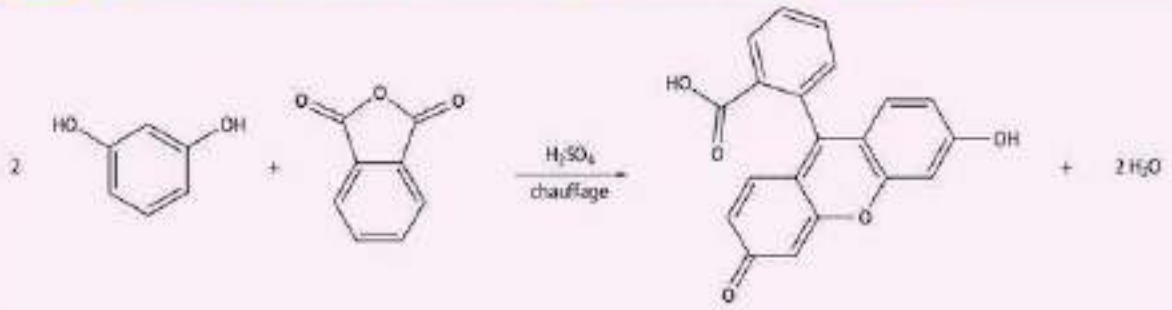
avec $[Flu^{2-}]_0$ la concentration en quantité de matière apportée d'ions fluorescinate, $[Flu^{2-}]_f$ la concentration en quantité de matière d'ions fluorescinate à l'équilibre, $[HFlu^-]_f$ la concentration en quantité de matière d'ions $HFlu^-$ à l'équilibre.

5. À partir des résultats précédents, en déduire la concentration en quantité de matière d'ions $HFlu^-$ à l'équilibre pour un $pH_{solution} = 7{,}0$, en utilisant la relation :

$$pH = pK_A + \log\left(\frac{[Flu^{2-}]_f}{[HFlu^-]_f}\right)$$

6. La valeur trouvée est-elle cohérente avec le diagramme de prédominance (doc. 1) ? Justifier la réponse.

DOC 3 Équation de la réaction de synthèse de la fluorescéine (à partir de la résorcine)



DOC 4 Protocole de synthèse de la fluorescéine

- Broyer 3,30 g de résorcine et 2,00 g d'anhydride phtalique.
- Introduire ce broyat dans un ballon de 100 mL, puis le placer dans un bain d'huile thermostaté à 180 °C.
- Ajouter quelques gouttes d'acide sulfurique concentré (étape 1).
- Chauffer pendant 30 min tout en agitant.

Le système prend alors rapidement une couleur rougeâtre et des vapeurs sont émises (étape 2).

- Laisser refroidir. *Le produit brut passe à l'état solide.*
- Dissoudre le produit obtenu en ajoutant progressivement une solution aqueuse de soude à 1 mol · L^{-1} (étape 3).
- Placer la solution obtenue dans un grand bécher.
- Pour précipiter la fluorescéine, acidifier la solution en ajoutant progressivement de l'acide sulfurique tout en agitant. Arrêter quand la phase aqueuse devient limpide (étape 4), puis filtrer sur Büchner.

Partie B Synthèse de la fluorescéine

1. Identifier les deux réactifs résorcine et anhydride phtalique dans l'équation de réaction (doc. 3). Justifier la démarche adoptée.

2. Montrer que la résorcine est introduite en excès.

3. Sous quel état physique se trouvent les réactifs à la température du bain d'huile ?

4. Quel est le rôle de l'acide sulfurique lors de l'étape 1 ? Justifier la réponse.

5. Quelle est la nature des vapeurs émises lors de l'étape 2 ? Justifier la réponse.

6. À la fin de l'étape 3, sous quelle forme la fluorescéine prédomine-t-elle ?

7. Pourquoi l'ajout d'acide sulfurique dans l'étape 4 permet-il la précipitation de la fluorescéine ?

8. Une masse de 2,47 g de fluorescéine est obtenue, quel est le rendement de la synthèse ?

EXERCICES DE SYNTHÈSE PREPA BAC

60 min

5 Étude d'une pile

La pile étudiée est une pile diiode-zinc. Elle est composée de deux demi-piles reliées par un pont salin, papier filtre imbibé d'une solution de chlorure de potassium (K^+ (aq), Cl^- (aq)).

La première demi-pile (compartiment 1) est constituée d'une lame de zinc plongeant dans 100 mL de solution incolore (photo de gauche) contenant des ions zinc à la concentration en quantité de matière $[Zn^{2+}(aq)]_0 = 1{,}0 \times 10^{-1}$ mol · L^{-1}.

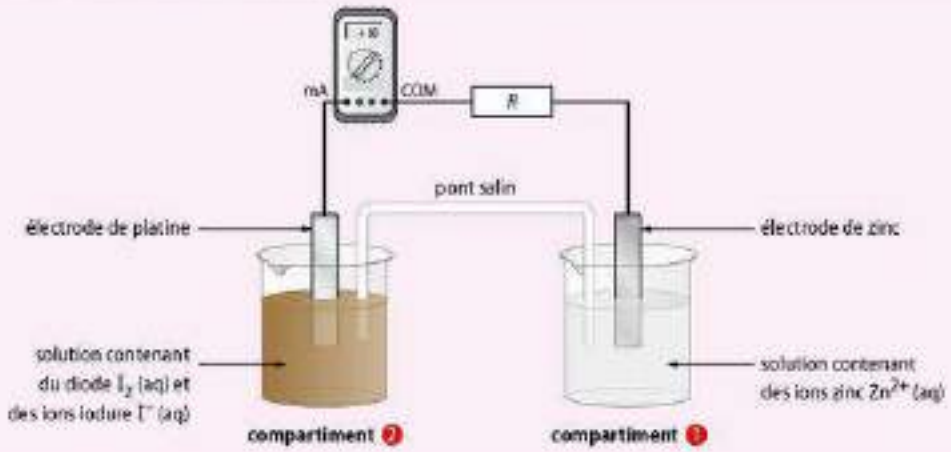
La seconde demi-pile (compartiment 2) est constituée d'une lame de platine plongeant dans 100 mL d'une solution brune (photo de droite) contenant du diiode et des ions iodure de concentrations respectives en quantité de matière : $[I_2(aq)]_0 = 1{,}0 \times 10^{-1}$ mol · L^{-1} et $[I^-(aq)]_0 = 5{,}0 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.


solution incolore


solution brune

On associe à cette pile un ampèremètre et une résistance en série.

DOC 1 Schématisation de la pile diiode-zinc



DOC 2 Données

- L'électrode de platine ne subit aucune altération chimique lorsque la pile fonctionne.
- La couleur brune de la solution du compartiment 2 est due à la présence de diiode, seule espèce colorée mise en jeu.
- Couples oxydant-réducteur : I_2 (aq) / I^- (aq) ; Zn^{2+} (aq) / Zn (s).
- Constante d'Avogadro : $N_A = 6{,}02 \times 10^{23}$ mol^{-1}.
- Charge élémentaire $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C.
- La constante d'équilibre associée à l'équation de la réaction ayant pour réactifs le zinc métal et le diiode en solution aqueuse est $K(T) = 10^{46}$ à la température $T = 25$ °C.

Partie A La pile

1. Réalisation de la pile

a. Reproduire le schéma de la pile et indiquer le sens du courant, le sens de déplacement des porteurs de charges à l'extérieur de la pile et les polarités de la pile. Justifier les réponses.

b. Écrire les demi-équations des réactions se produisant aux électrodes et préciser la nature de ces réactions.

c. En déduire l'équation globale de fonctionnement de la pile.

d. Préciser la nature des porteurs de charges à l'intérieur de la pile et le rôle du pont salin.

2. Étude de la pile

a. Donner l'expression du quotient de réaction initial $Q_{r,i}$ et calculer sa valeur.

b. Prévoir le sens d'évolution spontanée du système chimique constituant la pile.

c. Que peut-on dire de l'évolution de la concentration en quantité de matière de diiode dans le compartiment ❷ lorsque la pile fonctionne ? Justifier à partir de l'expression du quotient de réaction initial $Q_{r,i}$.

Partie B Titrage du diiode

On laisse fonctionner la pile pendant la durée Δt.

On suppose que l'intensité I du courant débité par la pile reste constante et égale à 50 mA.

Pour déterminer la quantité de matière de diiode consommé pendant le fonctionnement de la pile, on titre le diiode restant dans le compartiment ❷ de la pile avec une solution incolore de thiosulfate de sodium ($2\,Na^+(aq)$, $S_2O_3^{2-}(aq)$) de concentration en quantité de matière de soluté apporté $c = 2{,}0 \times 10^{-1}\ mol \cdot L^{-1}$.

Le volume de solution de thiosulfate de sodium versé à l'équivalence est $V_E = 14{,}7\ mL$.

L'équation de la réaction servant de support au titrage est :

$$2\,S_2O_3^{2-}(aq) + I_2(aq) \rightarrow S_4O_6^{2-}(aq) + 2\,I^-(aq)$$

1. Faire un schéma annoté du dispositif expérimental de titrage.

2. Définir l'équivalence d'un titrage. Comment est-elle repérée ici ?

3. Quantité de matière de diiode consommé

On note x l'avancement de la réaction de titrage.

a. Recopier et compléter le tableau d'avancement donné ci-après.

b. Déterminer la valeur de la quantité de matière n' de diiode restant dans le compartiment ❷ avant le titrage.

c. En déduire la quantité de matière $n_{cons}(I_2)$ de diiode consommé lors du fonctionnement de la pile.

Équation de la réaction		$2\,S_2O_3^{2-}(aq)$ + $I_2(aq)$ → $S_4O_6^{2-}(aq)$ + $2\,I^-(aq)$			
État du système	**Avancement** (en mol)	**Quantité de matière** (en mol)			
État initial	0	n	n'		$n_i(I^-)$
En cours de transformation	x				

4. Durée de fonctionnement de la pile

a. En déduire la valeur de l'avancement x' de la réaction correspondant au fonctionnement de la pile au bout de la durée Δt.

b. Exprimer la quantité de matière d'électrons échangés pendant le fonctionnement de la pile en fonction de x'.

c. Vérifier que la quantité de charges électriques fournie par la pile est proche de $1{,}6 \times 10^3\ C$.

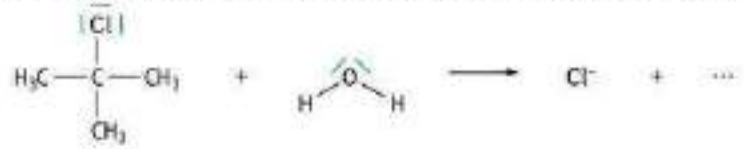
d. En déduire la durée Δt de fonctionnement de la pile.

EXERCICES DE SYNTHÈSE — PRÉPA BAC

50 min

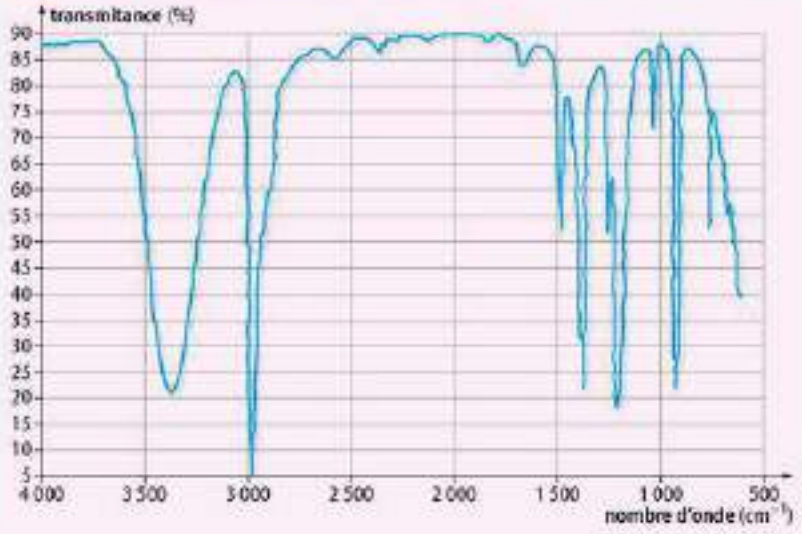
6 Suivi temporel d'une transformation chimique

On s'intéresse à la transformation chimique entre l'eau et le 2-chloro-2-méthylpropane d'équation :



On rappelle que dans le modèle de la représentation de Lewis, une liaison covalente est représentée par un trait entre deux atomes et qu'un doublet non liant est représenté par un trait localisé sur un atome.

DOC 1 Spectre IR du produit de la réaction



DOC 2 Données

- Valeurs d'électronégativité :
  - $\chi(H) = 2,20$
  - $\chi(C) = 2,55$
  - $\chi(Cl) = 3,16$
  - $\chi(O) = 3,44$

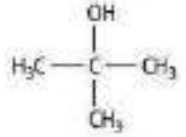
Partie A Étude de la transformation

1. Préciser les polarités de la liaison C—Cl dans le 2-chloro-2-méthylpropane et des liaisons O—H dans l'eau.

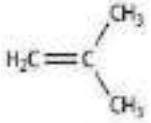
2. Identifier les sites donneurs et accepteurs d'électrons pouvant être mis en jeu dans cette réaction.

3. La transformation chimique entre l'eau et le 2-chloro-2-méthylpropane peut conduire à deux produits par une substitution ou une élimination.

Attribuer à chaque molécule représentée ci-dessous, le type de réaction en le justifiant.



molécule 1



molécule 2

4. À partir du spectre IR du produit de la réaction (doc. 1), indiquer la présence ou l'absence de chaque groupe caractéristique mentionné dans le tableau ci-après.

5. En déduire le nom du produit formé et la nature de la réaction étudiée.

6. Recopier et compléter l'équation de réaction. Justifier qualitativement que cette réaction puisse être suivie par conductimétrie.

Groupe caractéristique	Nombre d'onde (en cm^{-1})
O—H(1)	3 200 - 3 400
C—H(2)	3 000 - 3 100
C—H(3)	2 810 - 3 000
C=C	1 620 - 1 680

(1) alcool avec des liaisons H.
(2) C lié à une double liaison.
(3) C ayant quatre liaisons covalentes simples.

Partie B Suivi temporel de l'évolution du système

Deux mélanges eau-acétone sont étudiés à différentes températures.

L'eau est ici en large excès, elle intervient donc comme solvant et comme réactif.

Les conditions opératoires sont résumées dans le tableau ci-après.

Le mélange eau-acétone est versé dans un bécher de 100 mL qui est placé dans un bain thermostaté.

Lorsque la température à l'intérieur du bécher est stabilisée à la valeur désirée, une sonde conductimétrique est introduite, puis 1,0 mL de 2-chloro-2-méthylpropane est ajouté dans le milieu réactionnel sous agitation.

Au bout de quelques secondes, l'agitation est stoppée, puis la conductivité de la solution est suivie au cours du temps à l'aide d'un système informatisé.

La durée de l'acquisition est de 20 min pour chaque expérience.

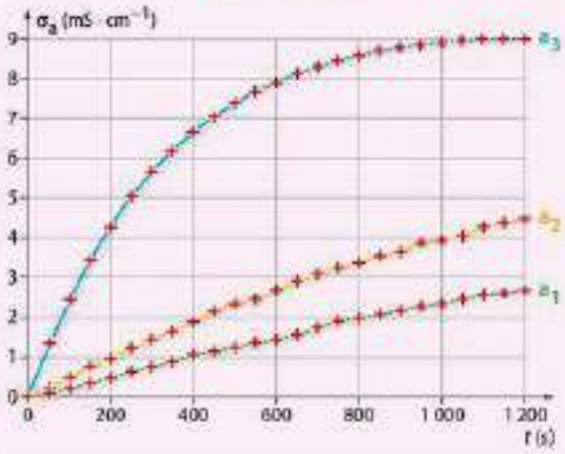
On suppose que $\sigma(t) = K \cdot x(t)$:

- $\sigma(t)$ représente la conductivité de la solution à un instant donné, à laquelle on a soustraite la conductivité initiale de la solution ;
- K est une constante qui va dépendre du mélange considéré et de la température ;
- $x(t)$ représente l'avancement de la réaction à un instant donné.

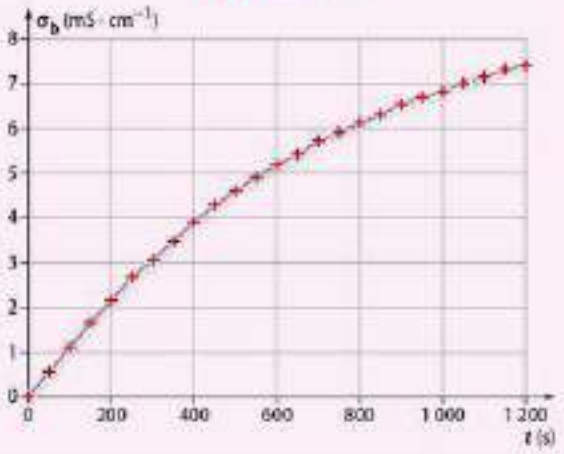
Expérience	Eau	Acétone	2-chloro-2-méthylpropane	Température (en °C)
a_1	30 g	20 g	1,0 mL	25
a_2	30 g	20 g	1,0 mL	30
a_3	30 g	20 g	1,0 mL	40
b	25 g	25 g	1,0 mL	40

DOC 3 Évolution de la conductivité σ au cours du temps t

Expériences a



Expérience b



1. En comparant les expériences a_1, a_2 et a_3, et en justifiant brièvement, indiquer l'influence de la température sur la vitesse volumique d'apparition du produit de la réaction.

2. En comparant les expériences a_3 et b, indiquer l'influence de la proportion d'eau par rapport à l'acétone sur la vitesse volumique d'apparition du produit de la réaction. Justifier la réponse.

3. Définir le temps de demi-réaction.

4. Donner la valeur du temps de demi-réaction dans le cas de l'expérience a_3.

EXERCICES DE SYNTHÈSE PREPA BAC

45 min

7 Une histoire de caféine !

Selon la légende, le café fut remarqué pour la première fois quelques 850 ans avant notre ère : un berger du Yémen nota que ses brebis étaient dans un état d'excitation inhabituel lorsqu'elles consommaient les baies d'un arbre des montagnes...

On considère que c'est la caféine contenue dans les grains de café de ces baies qui était l'espèce responsable de cette excitation.

Plus la teneur en caféine d'une tasse de café est importante, plus l'excitation du consommateur sera grande.

Le but de l'exercice est de déterminer la concentration en caféine dans deux tasses de thé de provenances différentes, notées boisson **a** et boisson **b**, pour déterminer celui qui est le plus excitant.



DOC 1 Données

- Le thé contient environ 5 % de caféine, mais il contient aussi d'autres substances comme des sucres, des pigments, des graisses...
- Le dichlorométhane a pour densité $d = 1{,}30$ et se trouve à l'état liquide dans les conditions de l'expérience.
- Le dichlorométhane n'est pas miscible à l'eau.

- Solubilité de la caféine :

Dans le dichlorométhane	Dans l'eau à 25 °C	Dans l'eau à 65 °C
importante	faible	très importante

DOC 2 Protocole expérimental et extraction de la caféine

- On extrait la caféine des feuilles de thé et on la purifie.
- Avec la caféine purifiée, on prépare des solutions de différentes concentrations en quantité de matière de caféine.
- À l'aide d'un spectrophotomètre, on mesure ensuite l'absorbance A de ces solutions de caféine.

L'extraction de la caféine se fait en quatre étapes.

Étape 1 :
Dans un ballon surmonté d'un réfrigérant, on introduit des feuilles de thé et de l'eau distillée. On chauffe tout en agitant pendant 2 heures.

Étape 2 :
On laisse refroidir le contenu du ballon, puis on le mélange à du dichlorométhane. Seule la phase organique est recueillie.

Étape 3 :
La phase organique est mélangée à du sulfate de magnésium anhydre, puis filtrée.

Étape 4 :
Après évaporation du solvant, on obtient une poudre blanche qui contient principalement de la caféine.

Partie A Extraction de la caféine

1. Dans l'étape 1 de l'extraction de la caféine, quel est le rôle du réfrigérant ?
Le schématiser surmontant le ballon sans oublier d'indiquer la circulation d'eau.

2. En utilisant les données (doc. 1), justifier le chauffage dans cette première étape.

3. Pour l'étape 2, dessiner le dispositif permettant de recueillir la phase organique et indiquer la position des phases aqueuse et organique.
Dans quelle phase la quasi-totalité de la caféine extraite se trouve-t-elle ? Justifier la réponse.

4. Dans l'étape 2, quelle technique est mise en œuvre ?

5. Quel est le rôle du sulfate de magnésium anhydre utilisé à l'étape 3 ?

6. Il est possible de purifier un solide tel que la caféine extraite.
Nommer une technique de purification d'un solide.

DOC 3 Matériel à disposition

- Bêchers de 100 mL et 200 mL
- Fioles jaugées de 5,0 mL, 10,0 mL et 50,0 mL
- Pipettes jaugées de 2,0 mL et 5,0 mL
- Éprouvette graduée de 5 mL

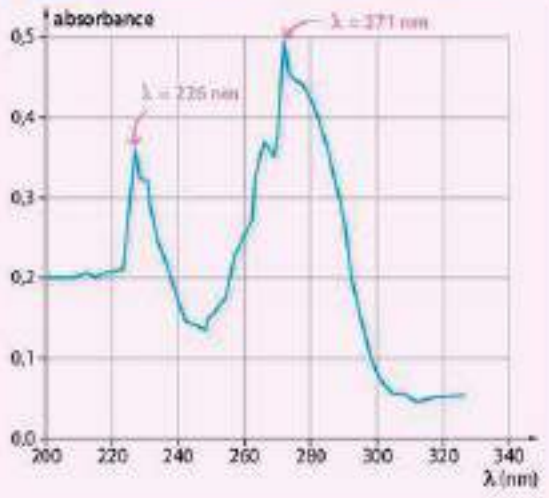
Partie B Préparation de solutions de caféine

La caféine extraite et purifiée, et le dichlorométhane sont utilisés pour mettre au point une solution de caféine de concentration en masse 32 mg · L^{-1}.

On souhaite ensuite préparer des solutions de concentrations en masse de caféine de 4 mg · L^{-1}, 8 mg · L^{-1}, 12 mg · L^{-1} et 16 mg · L^{-1}.

- Parmi le matériel fourni (doc. 3), indiquer celui utilisé pour préparer la solution de caféine de concentration en masse 16 mg · L^{-1}. Justifier le choix effectué.

DOC 4 Spectre d'absorption de la caféine



DOC 5 Courbe d'étalonnage de la caféine



Partie C Mesure d'absorbance

1. À quelle longueur d'onde faut-il régler le spectrophotomètre pour tracer $A = f(c)$: la courbe d'absorbance A en fonction de la concentration c des cinq solutions de caféine ? Justifier la réponse.

2. Pour cela, peut-on utiliser un spectrophotomètre UV-visible ?

3. La molécule de caféine est-elle colorée ? Justifier la réponse.

4. Sans changer les réglages du spectrophotomètre, on mesure les absorbances A des boissons **a** et **b**.
On trouve : $A = 0{,}17$ pour la boisson **a** et $A = 0{,}53$ pour la boisson **b**.
Quel est le thé le plus excitant pour le consommateur ?

5. Quelle est la concentration en masse de la solution qui a servi à tracer le spectre d'absorption donné (doc. 4) ?

Avant d'aborder le chapitre EN AUTONOMIE

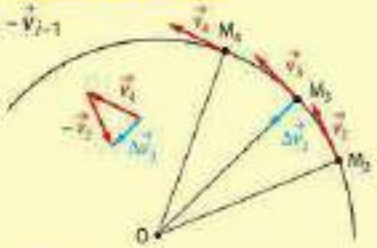
LES ACQUIS INDISPENSABLES

1re Enseignement de spécialité — Seconde

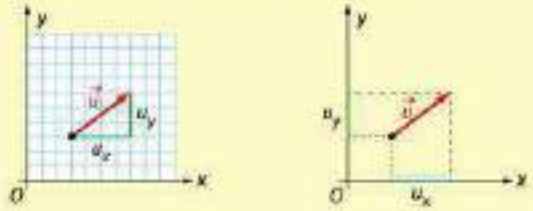
- Pour décrire un mouvement, il faut décrire la forme de la trajectoire : **rectiligne** (en ligne droite), **circulaire** (en forme de cercle) ou bien curviligne (de forme quelconque) et la façon de la parcourir (uniforme ou non uniforme).

- Vecteur **variation de vitesse** :

$\Delta\vec{v}_i = \vec{v}_{i+1} - \vec{v}_{i-1}$



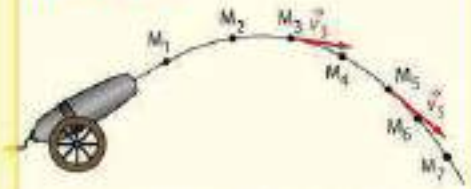
- Composantes d'un vecteur dans un repère orthonormé



POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

Pour chaque situation, rédiger une réponse qui explique en quelques lignes le raisonnement.

SITUATION 1

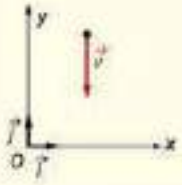


Lors du mouvement du boulet de canon, le vecteur vitesse ne garde pas une direction constante.

Que peut-on dire du vecteur variation de vitesse ?

SITUATION 2

La norme de la vitesse représentée ci-contre est de 3,2 m · s^{-1}.



Quelle est l'expression de ce vecteur dans la base vectorielle proposée ?



SITUATION 3

Le mouvement du wagon de montagne russe ci-contre se décompose en 2 phases bien distinctes.

Quel est le mouvement du wagon dans chacune des phases ?



CHAPITRE

10

PHYSIQUE

d'un mouvement



Lorsque le mouvement est uniforme, comme dans un manège qui tourne à vitesse constante, que peut-on dire de l'accélération ?

→ EXERCICE 42

NOTIONS ET CONTENUS

- Vecteurs position, vitesse et accélération d'un point.
- Coordonnées des vecteurs vitesse et accélération dans le repère de Frenet pour un mouvement circulaire.
- Mouvement rectiligne uniformément accéléré. Mouvement circulaire uniforme.

CAPACITÉS EXPÉRIMENTALES

- Réaliser et/ou exploiter une vidéo ou une chronophotographie pour déterminer les coordonnées du vecteur position en fonction du temps et en déduire les coordonnées approchées ou les représentations des vecteurs vitesse et accélération. → Activités 1 et 2

CAPACITÉS MATHÉMATIQUES

- Dériver une fonction. → Activités 1, 2 et 3

COMPÉTENCES :
ANA/RAI Procéder à des analogies.
RÉA Mettre en œuvre un protocole expérimental

Étude d'un mouvement

Un projectile est un objet auquel on donne une vitesse initiale. Les composantes des vecteurs position et vitesse permettent de caractériser le mouvement.

SITUATION-PROBLÈME

Le lancer du poids est une discipline olympique où il faut lancer une boule en métal aussi loin que possible.

L'athlète fournit à la boule une vitesse initiale, faisant un angle α avec le plan horizontal.

Le mouvement de la boule est-il modélisable ?

Comment évoluent les vecteurs vitesse et accélération au cours du mouvement ?

COUP DE POUCE ➡ p. 593



Kevin Mayer – Champion du monde 2017 du décathlon

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Pour préparer l'exploitation de l'enregistrement du mouvement

- Réaliser l'enregistrement vidéo du lancer du projectile choisi.
- À l'aide d'un logiciel de pointage vidéo, repérer les positions successives du centre du projectile.
- Exporter les données vers un tableur.

UN PONT VERS LES MATHS

Calcul des composantes des vecteurs vitesse et accélération à partir des coordonnées de positions :

$$\vec{v} = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt} = \begin{pmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \end{pmatrix} \qquad \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \begin{pmatrix} \frac{dv_x}{dt} \\ \frac{dv_y}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{d^2x}{dt^2} \\ \frac{d^2y}{dt^2} \end{pmatrix}$$

➡ Fiche MATHS p. 536

MESURES ET ANALYSE

1 Enregistrement du mouvement

a. Réaliser le protocole expérimental permettant de préparer l'enregistrement (FICHE MÉTHODE ➡ p. 586).

b. Justifier les différentes étapes de la préparation de la captation.

c. Réaliser le protocole expérimental permettant de préparer l'exploitation de l'enregistrement.

d. Tracer la représentation graphique des positions et l'imprimer.

2 Exploitation de la représentation graphique des positions du projectile

Construire le vecteur accélération du point étudié en trois endroits du mouvement : pendant la phase de montée, au sommet de la trajectoire et pendant la phase de descente (FICHE MÉTHODE ➡ p. 554).

3 Exploitation des données à l'aide du tableur

À l'aide du tableur, calculer les composantes des vecteurs vitesse et accélération et les représenter graphiquement.

CONCLUSION

Décrire le type de mouvement sur chacun des axes.

Retrouver les caractéristiques des vecteurs vitesse et accélération tracés, à partir de leurs composantes.

Je réussis si...

- **Je sais réaliser et exploiter une vidéo pour déterminer les coordonnées vecteur position en fonction du temps.**
- **Je sais déduire des coordonnées vecteur position, les coordonnées approchées ou les représentations des vecteurs vitesse et accélération.**

TP

COMPÉTENCES :
(VAL) Estimer une incertitude, comparer à une valeur de référence.
(RÉA) Effectuer des procédures courantes (calculs, représentations, collectes de données).

Mouvement de la terre sur son orbite

Leurs vecteurs vitesse et accélération de la Terre renseignent sur son mouvement particulier autour du Soleil.

DOC 1 Mouvements planétaires

ANIMATION Mouvements planétaires



Une vidéo montre, à partir d'images extraites d'un logiciel de simulation, des mouvements planétaires.

La durée entre chaque image est de 10 jours. Toutes les orbites ne sont pas dans le même plan : Le plan de la vidéo correspond à celui de l'écliptique (plan de l'orbite terrestre).

DONNÉE

- Rayon de l'orbite terrestre : $R = 1{,}49 \cdot 10^{11}$ m

UN PONT VERS LES MATHS

La norme de $\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix}$ est : $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$.

Si σ est l'écart-type pour n mesures, l'incertitude type est : $U = \dfrac{\sigma_n}{\sqrt{n}}$

→ Fiche MATHS p. 538

DOC 2 Exploitation des données

Le programme Python ci-dessous permet de récupérer les données numériques d'un fichier csv et de tracer les vecteurs vitesse et accélération dans un graphique représentant une chronophotographie du mouvement.

Langage python : *n.mean(array)* et *std(array, ddof=1)* permettent respectivement de calculer la **moyenne** et l'**écart type** d'un tableau de valeurs (*array*).

La fonction *plt.quiver()* permet de tracer un vecteur. On pourra connaître la syntaxe de la fonction en exécutant : *help(plt.quiver)* dans une console python (voir FICHE MÉTHODE ➥ p. 560)

```
import matplotlib.pyplot as plt ; import
  numpy as n
#### Coordonnées des points en fonction du temps  ####
fic = open("Mouvement_Terre.csv",'r')                #
donnee=fic.readlines()                               #
x=[] ; y=[] ; dt = 10*86400 # 10 jours entre 2 points#
for point in donnee :                                #
    point=point.split() # chaque point est un triplet#
    if point[0][0].isnumeric():                      #
        x.append(float(point[1].replace(',','.')))   #
        y.append(float(point[2].replace(',','.')))   #
### Calcul de vx, vy et v pour le vecteur vitesse ###
vx=[] ; vy=[] ; v=[]                                 #
for i in range(1,len(x)-1):                          #
    vx.append((x[i+1]-x[i-1])/(2*dt))                #
    vy.append((y[i+1]-y[i-1])/(2*dt))                #
    v.append((vx[-1]**2+vy[-1]**2)**0.5)             #
# Calcul de ax, ay et a pour le vecteur accélération #
#TODO
#########  Tracé des champs de vecteurs:  ##########
vec_v=plt.quiver(x[1:-1],y[1:-1],vx,vy,color="green")#
plt.quiverkey(vec_v,X=0.7, Y=1.05, U=5e4,label='V')  #
vec_a=plt.quiver(x[2:-2],y[2:-2],ax,ay,color="blue") #
plt.quiverkey(vec_a,X=0.2, Y=1.05, U=1e-2,label='a') #
plt.plot(x,y,"ro") ; plt.axis('equal')               #
plt.show()                                           #
##########      Traitement statistique     ##########
v = n.array(v) ; a = n.array(a) # données sous numpy #
```

MESURES ET ANALYSE

1 Utilisation d'un logiciel de pointage

À l'aide d'un logiciel de pointage vidéo, repérer les positions successives de la Terre au cours de son mouvement. Exporter ces données dans un fichier que vous nommerez : « Mouvement_Terre.csv »

2 Utilisation d'un langage de programmation

a. Compléter la partie du programme proposé afin que celui-ci, en chaque position du mouvement, puisse :
- déterminer les coordonnées du vecteur vitesse ;
- déterminer les coordonnées du vecteur accélération ;
- tracer le vecteur vitesse ;
- tracer le vecteur accélération.

b. Compléter la fin du programme proposé afin que celui-ci puisse :
- déterminer la moyenne de v et l'incertitude-type associée ;
- déterminer la moyenne de a et l'incertitude-type associée.

c. $a = k\dfrac{v^2}{R}$. Compléter la fin du programme proposé afin de déterminer k.

CONCLUSION

Commenter les directions et les normes des vecteurs vitesse et accélération.

Décrire le mouvement de la Terre et donner la relation entre a, v^2 et R pour ce type de mouvement.

Je réussis si...

- **Je sais déduire des coordonnées vecteur position les coordonnées approchées ou les représentations des vecteurs vitesse et accélération.**
- **Je sais représenter, à l'aide d'un langage de programmation, des vecteurs accélération d'un point lors d'un mouvement.**

TP

COMPÉTENCES :
VAL Confronter un modèle à des résultats expérimentaux.
APP Rechercher et organiser l'information en lien avec la problématique étudiée

Descente olympique en bobsleigh

Le bobsleigh est une discipline sportive qui consiste à descendre le plus rapidement possible une piste en glace à l'aide d'une luge.

DOC 1 Le départ : la prise d'élan

La prise d'élan au début de la descente : 6 s de course sur 50 m pour atteindre la vitesse de 40 km · h^{-1}.



DOC 2 Un parcours à grande vitesse

Les athlètes s'élancent en poussant la luge puis s'y insèrent. Le pilote guide ensuite la luge dans la descente. Pour simplifier, on considérera que la vitesse ne varie plus à partir de la moitié de la piste et que sa valeur est $v = 110$ km · h^{-1}.



QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1 Vérifier que pour un mouvement uniformément accéléré, la distance parcourue au bout d'un temps t est : $d = \frac{1}{2}at^2$.

2 a. **Zone 1 / Prise d'élan** Quelle devrait être la vitesse atteinte dans les conditions données à la figure 1 si le mouvement était uniformément accéléré lors de la prise d'élan ? Est-ce le cas ?

b. **Zone 2 / Virage** À partir des documents fournis, déterminer la valeur de l'accélération dans le virage de la zone 2.

c. **Zone 3 / Arrivée** Pour simplifier, on considérera que durant la phase de freinage, l'accélération est constante. En s'aidant notamment de la démarche suivie dans **1**, déterminer la valeur de l'accélération durant cette phase.

DOC 3 Une seule piste olympique en France

La piste olympique de La Plagne, en Savoie : 1 507 m de piste pour un dénivelé de 124,5 m.



PROBLÉMATIQUE

Représenter un vecteur accélération dans chacune des zones encadrée du document 3, en tenant compte, tant que possible, de la direction, du sens et de la norme du vecteur. (Pour la zone 1, on prendra la valeur calculée au 1.b.)

Je réussis si...

- **Je sais caractériser le vecteur accélération pour les mouvements suivants : rectiligne, rectiligne uniforme, rectiligne uniformément accéléré, circulaire, circulaire uniforme.**
- **Établir les coordonnées cartésiennes des vecteurs vitesse et accélération à partir des coordonnées du vecteur position.**

1 Les vecteurs du mouvement

Le vecteur position

La description du mouvement d'un point M consiste à connaître à chaque instant les coordonnées $x(t)$, $y(t)$ et $z(t)$ de ce point dans l'espace. Le vecteur position $\overrightarrow{OM}(t)$ fournit toutes ces informations (FIG. 1).

Les composantes du vecteur position $\overrightarrow{OM}(t)$ dans un repère orthonormé sont les coordonnées du point M à l'instant t :

$$\overrightarrow{OM}(t) = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j} + z(t)\vec{k} = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix}$$

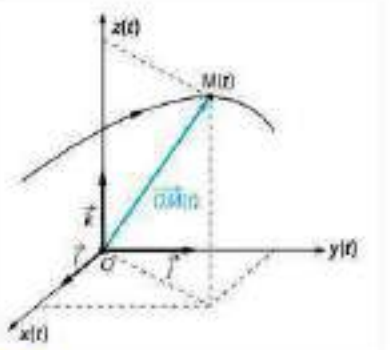


FIG. 1 Représentation du vecteur position dans un repère cartésien.

Le vecteur vitesse

Le vecteur vitesse décrit l'évolution de la position au cours du temps. Il se calcule à un instant donné t_i, à partir du vecteur $\Delta\overrightarrow{OM}(t_i) = \overrightarrow{OM}(t_{i+1}) - \overrightarrow{OM}(t_{i-1})$ représentant la variation du vecteur position entre les instants précédent et suivant :

$$\vec{v}(t_i) = \frac{\Delta\overrightarrow{OM}(t_i)}{t_{i+1} - t_{i-1}} = \frac{\Delta\overrightarrow{OM}(t_i)}{\Delta t}$$

(FIG. 2)

Lorsqu'on fait tendre Δt vers 0, le vecteur vitesse tend vers la **dérivée** du vecteur position.

Le vecteur vitesse est ainsi défini par l'expression :

$$\vec{v}(t) = \frac{d\overrightarrow{OM}(t)}{dt}$$

Il a les caractéristiques suivantes :
- sa direction est tangente à la trajectoire ;
- son sens est celui du mouvement ;
- sa norme correspond à la valeur de la vitesse. Elle s'exprime en $m \cdot s^{-1}$.

Chaque composante du vecteur vitesse est la dérivée d'une composante du vecteur position dans le repère cartésien :

$$\vec{v}(t) = \frac{dx}{dt}\vec{i} + \frac{dy}{dt}\vec{j} + \frac{dz}{dt}\vec{k}$$

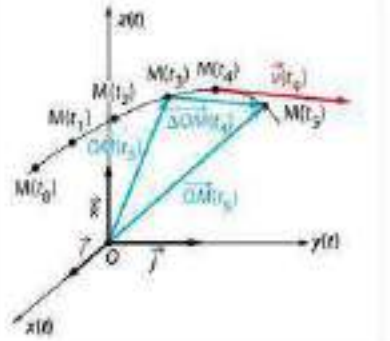


FIG. 2 Construction du vecteur vitesse en un point.

Le vecteur accélération

Le vecteur accélération décrit l'évolution du vecteur vitesse au cours du temps. Il se calcule à un instant donné t_i, à partir du vecteur $\Delta\vec{v}(t_i) = \vec{v}(t_{i+1}) - \vec{v}(t_{i-1})$ représentant la variation du vecteur vitesse entre les instants précédent et suivant :

$$\vec{a}(t_i) = \frac{\Delta\vec{v}(t_i)}{t_{i+1} - t_{i-1}} = \frac{\Delta\vec{v}(t_i)}{\Delta t}$$

(FIG. 3)

Lorsqu'on fait tendre Δt vers 0, le vecteur accélération tend vers la **dérivée** du vecteur vitesse.

Le vecteur accélération est ainsi défini par l'expression :

$$\vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}(t)}{dt}$$

Sa norme correspond à la valeur de l'accélération. Elle s'exprime en $m \cdot s^{-2}$.

UN PONT VERS LES MATHS

Plutôt que de construire le vecteur vitesse en un point, à partir du point d'avant et du point d'après, il est parfois choisi de faire le calcul suivant, plus proche de la définition mathématique de la dérivée (exemple avec la coordonnée sur l'axe Ox la vitesse) :

Soit $\overrightarrow{OM} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$ et $\vec{v} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix}$

$$v_{x_i} = \frac{x_{i+1} - x_i}{t_{i+1} - t_i}$$

→ Fiche MATHS p. 535

Remarque. Dans le langage commun la notion d'accélération est seulement liée à l'augmentation de la vitesse. **Le vecteur accélération** nous renseigne de façon plus générale : Si la norme de la vitesse change (qu'elle augmente ou qu'elle diminue) on dira effectivement que le vecteur accélération est non nul. Mais le vecteur accélération est également non nul si seule la direction du vecteur vitesse change. **Le vecteur accélération peut donc être parfois non nul dans le cas d'un mouvement uniforme.**

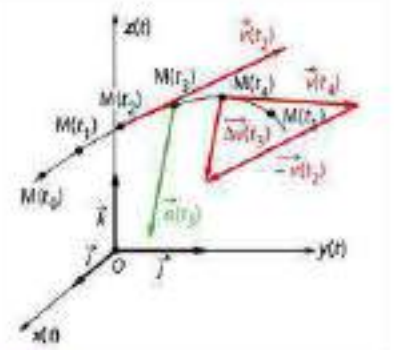


FIG. 3 Construction du vecteur accélération en un point.

2 Le repère de Frenet

Définition

Le repère de Frenet est définit par deux vecteurs orthogonaux $\vec{\tau}$ et $\vec{n}$ de norme 1, comme les vecteurs $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ du repère cartésien.

Ces vecteurs se définissent en chacun des points de la trajectoire :
- Le vecteur $\vec{\tau}$ est tangent à la trajectoire et dans le sens du mouvement ;
- Le vecteur $\vec{n}$ est orthogonal à $\vec{\tau}$ et dirigé vers le centre de la courbure de la trajectoire.

On dit que le repère de Frenet est **local** car il dépendent du point de la courbe auquel on s'intéresse (FIG. 4).

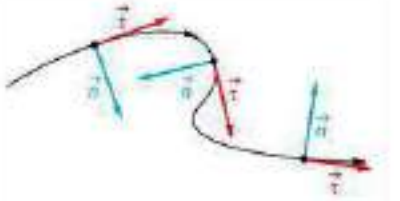


FIG. 4 Vecteurs de la base du repère de Frenet en quelques points d'une trajectoire quelconque.

Pour les mouvements circulaires

Dans le cas d'un mouvement **circulaire**, les vecteurs vitesse et accélération se décomposent dans le repère de Frenet de la façon suivante :
- le vecteur vitesse est colinéaire au vecteur $\vec{\tau}$, par définition. Le vecteur vitesse n'a donc pas de composante selon $\vec{n}$:

$$\vec{v} = v\vec{\tau}.$$

Cette expression du vecteur vitesse dans le repère de Frenet ne se limite d'ailleurs pas aux trajectoires circulaires, mais reste valable quel que soit le type de mouvement et de trajectoire.
- le vecteur accélération s'écrira :

$$\vec{a} = a_\tau\vec{\tau} + a_n\vec{n} \text{ avec } \begin{cases} a_\tau = \dfrac{dv}{dt} & v \text{ en m} \cdot \text{s}^{-1} ; \ a \text{ en m} \cdot \text{s}^{-2} ; \\ a_n = \dfrac{v^2}{R} & R \text{ étant le rayon de la trajectoire, en } m \end{cases}$$

(FIG. 5)

Les composantes du vecteur accélération peuvent nous donner des informations sur le mouvement.

Il est important de remarquer que les expressions des composantes du vecteur accélération font intervenir la valeur de la vitesse (la norme du vecteur et non le vecteur vitesse lui-même).

EXEMPLE

a_τ est : - nulle si la vitesse est constante (mouvement uniforme) ;
- positive si le mouvement est accéléré ;
- négative si le mouvement est ralenti.

Remarque. Le repère de Frenet n'est pas limité aux seuls mouvements circulaires. En effet, si on considère par exemple qu'un mouvement rectiligne correspond à un mouvement circulaire dont le rayon du cercle tend vers l'infini, la composante a_n tend alors vers 0 et le vecteur accélération est colinéaire à la vitesse et sa norme est bien $a = \dfrac{dv}{dt}$ (voir paragraphe 3).

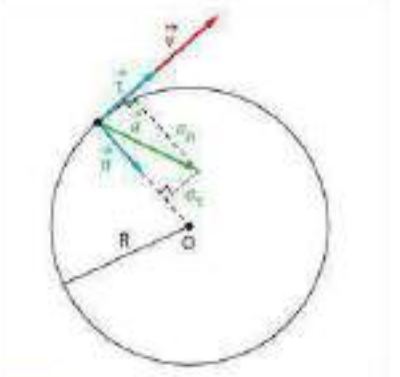


FIG. 5 Décomposition des vecteurs vitesse et accélération dans le repère de Frenet, dans le cas d'un mouvement circulaire.

3 Mouvements particuliers

Mouvements rectilignes

Un mouvement est rectiligne si la trajectoire étudiée est représentée par une droite.

Dans ce cas, les vecteurs vitesse et accélération gardent la même direction, celle de la trajectoire.

Dans le cas ou l'accélération est constante, il y a 3 cas (FIG. 6) :
- $\vec{a} = \vec{0}$; le vecteur vitesse est alors constant. On parle de mouvement **rectiligne uniforme** ;
- $\vec{a} \cdot \vec{v} > 0$ ($\vec{a}$ et $\vec{v}$ sont de même sens) ; le mouvement est **rectiligne uniformément accéléré**. La norme du vecteur vitesse augmente, son sens et sa direction restent les mêmes ;
- $\vec{a} \cdot \vec{v} < 0$ ($\vec{a}$ et $\vec{v}$ sont de sens opposés) ; le mouvement est **rectiligne uniformément ralenti**. La norme du vecteur vitesse diminue, son sens et sa direction restent les mêmes.

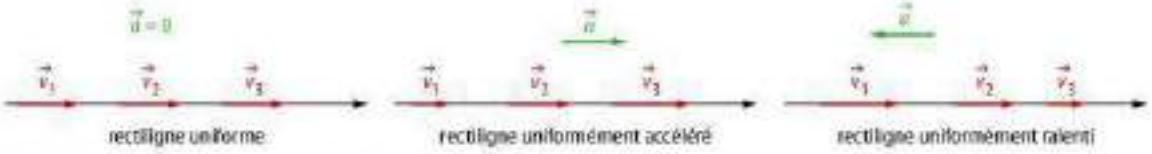


FIG. 6 Mouvements rectilignes à accélération constante.

EXEMPLE

Lorsqu'on lance un projectile verticalement vers le haut, l'accélération de la pesanteur qu'il subit est constante, verticale, vers le bas.

Au début du mouvement le vecteur vitesse est vertical, dirigé vers le haut. Dans cette première phase du mouvement $\vec{a} \cdot \vec{v} < 0$; la vitesse du projectile diminue. Le mouvement est rectiligne ralenti.

Au sommet de la trajectoire, la vitesse devient nulle.

Puis le projectile redescend : $\vec{a} \cdot \vec{v} > 0$. La vitesse augmente, le mouvement est rectiligne accéléré.

Mouvements circulaires

Un mouvement est circulaire si la trajectoire étudiée est représentée par un cercle.

Dans le cas d'une trajectoire circulaire, les vecteurs vitesse et accélération ne sont plus colinéaires.

Si on utilise le repère de Frenet, on observe que a_t est nul, en effet :
- $a_t = \dfrac{dv}{dt} = 0$ si la valeur de la vitesse ne change pas ;
- $\vec{a}$ est ainsi tout le temps colinéaire à $\vec{n}$.

On peut écrire : $\vec{a} = \dfrac{v^2}{R}\vec{n}$

Ainsi, la valeur de l'accélération est constante : $a = \dfrac{v^2}{R}$.

Dans le cas particulier d'un mouvement circulaire et uniforme, les vecteurs vitesse et accélération sont orthogonaux (FIG. 7).

Et $\boxed{a = \dfrac{v^2}{R}}$ ou R est le rayon de la trajectoire.

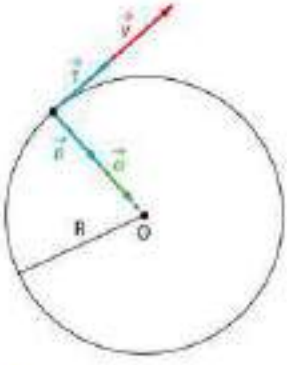


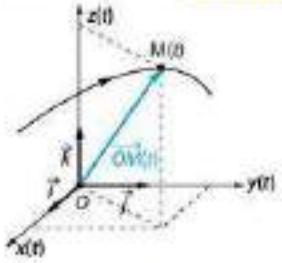
FIG. 7 Mouvement circulaire et uniforme.

Le vocabulaire à retenir
Les relations à connaître

FICHE MÉMO PRÉPA BAC

1 Les vecteurs du mouvement

Représentation du vecteur position

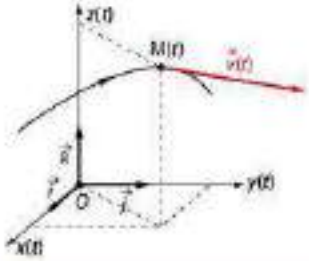


$$\overrightarrow{OM} = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix}$$

Construction du vecteur vitesse

$$\vec{v} = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt}$$

Sa direction est tangente à la trajectoire
Son sens est celui du mouvement
Sa norme s'exprime en $m \cdot s^{-1}$

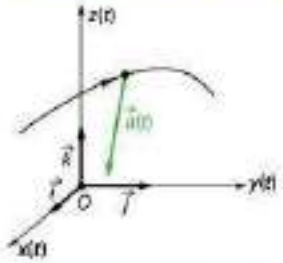


$$\vec{v} = \begin{pmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \\ \frac{dz}{dt} \end{pmatrix}$$

Variation du vecteur vitesse : le vecteur accélération

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$$

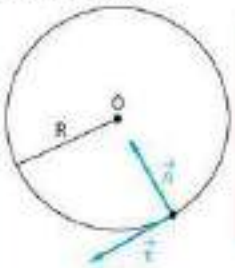
La norme du **vecteur accélération** s'exprime en $m \cdot s^{-2}$.



$$\vec{a} = \begin{pmatrix} \frac{dv_x}{dt} \\ \frac{dv_y}{dt} \\ \frac{dv_z}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{d^2x}{dt^2} \\ \frac{d^2y}{dt^2} \\ \frac{d^2z}{dt^2} \end{pmatrix}$$

2 Le repère de Frenet

Décomposition des vecteurs vitesse et accélération

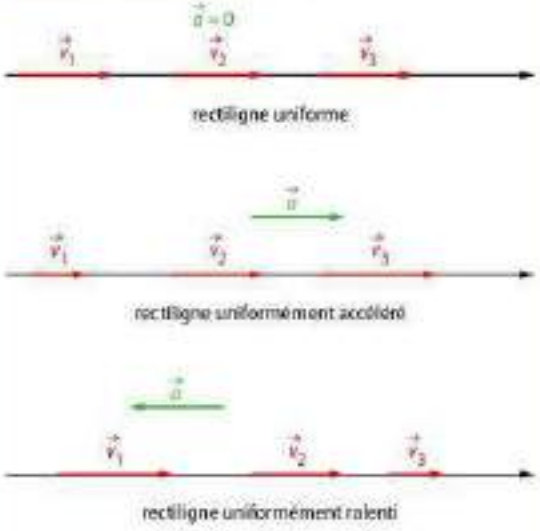


$$\vec{v} = v\vec{\tau} = \begin{pmatrix} v \\ 0 \end{pmatrix}$$

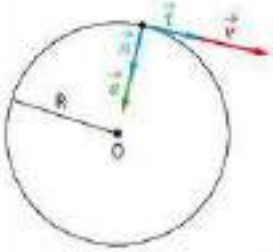
$$\vec{a} = \frac{dv}{dt}\vec{\tau} + \frac{v^2}{R}\vec{n} = \begin{pmatrix} \frac{dv}{dt} \\ \frac{v^2}{R} \end{pmatrix}$$

3 Les vecteurs du mouvement

Mouvements rectilignes : représentations



Mouvements circulaires uniformes : représentation et coordonnées des vecteurs vitesse et accélération



$$\vec{v} = v\vec{\tau} = \begin{pmatrix} v \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{a} = \frac{v^2}{R}\vec{n} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{v^2}{R} \end{pmatrix}$$

d'où $a = \frac{v^2}{R}$

Vérifier l'essentiel

EN AUTONOMIE

Pour chaque question, choisir la ou les bonnes réponses. ➡ SOLUTIONS EN PAGE 593





1 Les vecteurs du mouvement

	A	B	C
1 La relation entre vecteur position $\overrightarrow{OM}$ et vecteur vitesse $\vec{v}$ est :	$\vec{v} = k \cdot \overrightarrow{OM}$ avec k constant.	$\overrightarrow{OM} = \dfrac{d\vec{v}}{dt}$.	$\vec{v} = \dfrac{d\overrightarrow{OM}}{dt}$.
2 La relation entre vecteur vitesse $\vec{v}$ et vecteur accélération $\vec{a}$ est :	$\vec{a} = k \cdot \vec{v}$ avec k constant.	$\vec{a} = \dfrac{d\vec{v}}{dt}$.	$\vec{v} = \dfrac{d\vec{a}}{dt}$.
3 Lors d'un mouvement :	le vecteur vitesse est toujours tangent à la trajectoire.	le vecteur accélération est colinéaire au vecteur vitesse.	l'accélération s'exprime en $m \cdot s^{-2}$.

2 Repère de Frenet

	A	B	C
4 Les vecteurs $\vec{\tau}$ et $\vec{n}$ de la base du repère de Frenet :	gardent des directions constantes au cours du temps.	sont liés aux points de la trajectoire.	sont colinéaires aux vecteurs $\vec{i}$ et $\vec{j}$ de la base du repère cartésien.
5 Les expressions générales des vecteurs vitesse $\vec{v}$ et accélération $\vec{a}$ dans la base du repère de Frenet sont :	$\vec{v} = v\vec{\tau}$ $\vec{a} = \dfrac{dv}{dt} \cdot \vec{\tau} + \dfrac{\vec{v}^2}{R}\vec{n}$	$\vec{v} = v\vec{\tau}$ $\vec{a} = \dfrac{\vec{v}^2}{R}\vec{n}$	$\vec{v} = v\vec{\tau}$ $\vec{a} = \dfrac{dv}{dt}\vec{\tau} + \dfrac{\vec{v}^2}{R}\vec{n}$

3 Mouvements particuliers

	A	B	C
6 Pour un mouvement rectiligne :	les vecteurs vitesse $\vec{v}$ et accélération $\vec{a}$ sont colinéaires.	le vecteur $\vec{a}$ est nul.	on ne connaît pas, *a priori*, les directions des vecteur vitesse $\vec{v}$ et accélération $\vec{a}$.
7 Pour un mouvement circulaire :	les vecteurs vitesse $\vec{v}$ et accélération $\vec{a}$ sont colinéaires.	le vecteur $\vec{a}$ est forcément nul.	les vecteurs vitesse $\vec{v}$ et accélération $\vec{a}$ sont non colinéaires.
8 Pour un mouvement uniforme :	le vecteur accélération $\vec{a}$ est nul.	le vecteur $\vec{v}$ est constant.	la norme du vecteur $\vec{v}$ est constante.
9 Si les vecteurs vitesse $\vec{v}$ et accélération $\vec{a}$ sont colinéaires et de même sens, le mouvement sera :	rectiligne uniforme.	rectiligne accéléré.	rectiligne ralenti.

Acquérir les bases

1 Premier principe de la thermodynamique

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Vecteur position, vitesse et accélération d'un point

- Définir le vecteur vitesse comme la dérivée du vecteur position par rapport au temps et le vecteur accélération comme la dérivée du vecteur vitesse par rapport au temps

– Acquérir les bases : 11 14 – S'entraîner : 18

Coordonnées des vecteurs vitesse et accélération

- Établir les coordonnées cartésiennes des vecteurs vitesse et accélération à partir des coordonnées du vecteur position et/ou du vecteur vitesse.

– Acquérir les bases : 11 – S'entraîner : 24

10 Norme et vecteur

On étudie le mouvement d'un point M dans l'espace.

1. a. Rappeler la relation entre le vecteur position $\overrightarrow{OM}$ et le vecteur vitesse $\vec{v}_M$.

b. Rappeler la relation entre le vecteur vitesse $\vec{v}_M$ et le vecteur accélération $\vec{a}_M$.

2. a. Trouver un exemple de mouvement pour lequel on a la relation : $a = \frac{dv}{dt}$. Expliquer.

b. Trouver un exemple de mouvement pour lequel on a la relation : $a \neq \frac{dv}{dt}$. Expliquer.

11 Saut d'un tremplin en vélo



Un cycliste s'élance sur un tremplin de 2,0 m de haut. Arrivé en haut, sa vitesse lui permet de faire un saut. Les expressions des coordonnées du centre de masse du système {vélo + cycliste} durant ce saut ont été modélisées par des équations mathématiques. :

$$\begin{cases} x(t) = 3{,}39 \times t \\ y(t) = -4{,}9 \times t^2 + 5{,}87 \times t + 2{,}0 \end{cases}$$

Les coordonnées $x(t)$ et $y(t)$ sont exprimées en mètre, à condition que t soit en seconde.

1. a. Déterminer les composantes du vecteur vitesse au cours du temps.

b. En déduire la valeur de la vitesse à $t = 1{,}0$ s.

2. a. Déterminer les composantes du vecteur accélération au cours du temps.

b. Quelles remarques peut-on faire pour ce vecteur ?

c. Calculer la valeur de l'accélération au cours du mouvement.

12 Lancer vertical

La position d'un objet lancé depuis l'altitude h à la vitesse v_0 est donnée par l'expression :

$$\overrightarrow{OM} = \left(-\frac{1}{2}gt^2 + v_0 t + h\right)\vec{k}$$

($\vec{k}$ est vertical, vers le haut et $g = 9{,}8\ m \cdot s^{-2}$)

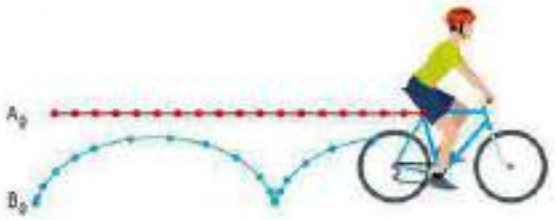
1. a. Donner l'expression de la vitesse de cet objet au cours du temps.

b. Montrer que le vecteur vitesse change de sens à un moment donné que l'on exprimera en fonction de v_0 et g.

2. Exprimer le vecteur accélération de cet objet et l'identifier à partir de ses caractéristiques.

13 Mouvement d'une valve de vélo

Une chronophotographie à l'échelle 1/40 du mouvement de deux points A et B d'un vélo a été reproduite ci-dessous :



Durée entre chaque points : $\Delta t = 20$ ms

1. a. Calculer la valeur de la vitesse $\|\vec{v}_A\|$ aux points A_3, A_8 et A_{14}. Quelles sont les caractéristiques (norme, sens, direction) du vecteur $\vec{v}_A$?

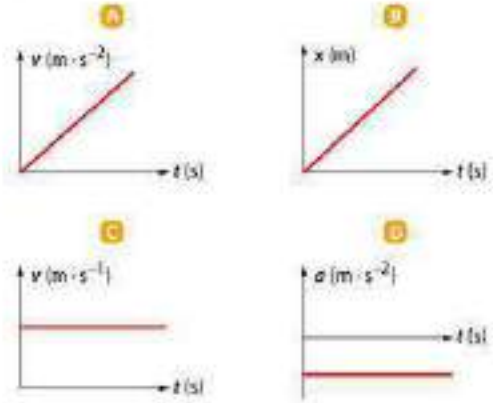
b. En déduire les caractéristiques du vecteur accélération $\vec{a}_A$.

2. a. À l'aide d'un papier calque, reproduire les points B_2 à B_{10}. Construire les vecteurs vitesse $\vec{v}_{B_3}$, $\vec{v}_{B_4}$, $\vec{v}_{B_7}$ et $\vec{v}_{B_9}$.

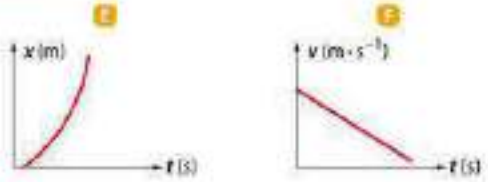
b. Sur la même chronophotographie, construire les vecteurs accélération $\vec{a}_{B_4}$, $\vec{a}_{B_6}$ et $\vec{a}_{B_8}$.

14 Différents mouvements

Trois mouvements rectilignes différents ont été étudiés. Des représentations graphiques temporelles des projections des vecteurs position, vitesse l'accélération pour ces mouvements sont proposées ci-dessous. Regrouper ces représentations graphiques de telle sorte que chaque groupe correspond à l'un des trois mouvement étudié.

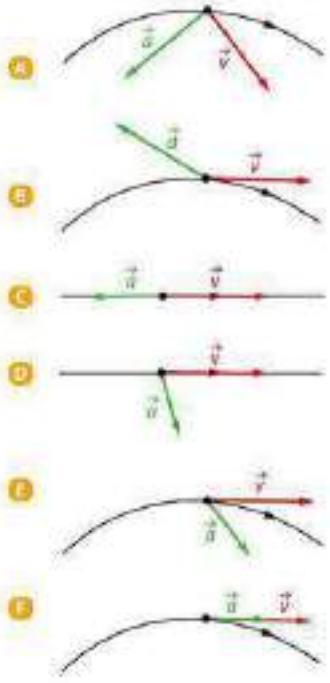


Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique



15 Mouvements impossibles

Ces représentations sont celles de trajectoires pour lesquelles un élève a associé en un point le vecteur vitesse et accélération pour traduire le mouvement. Certaines d'entre elles ne peuvent pas être correctes. Identifiez-les en justifiant.



2 Le repère de Frenet

EN AUTONOMIE

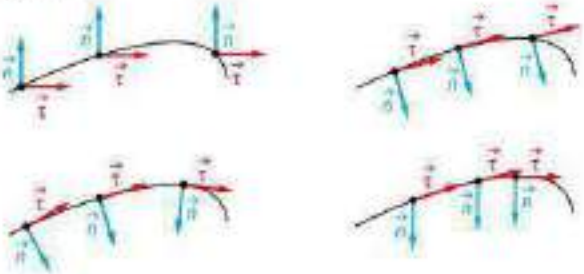
Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Citer et exploiter les expressions des coordonnées des vecteurs vitesse et accélération dans le repère de Frenet, dans le cas d'un mouvement circulaire

➡ Acquérir les bases : 11 ➡ S'entraîner : 21

16 Les bons repères de Frenet

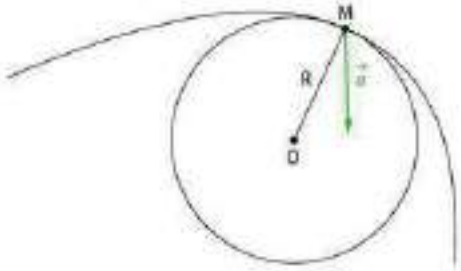
1. Choisir la (les) bonne(s) représentation(s) du repère de Frenet :



2. Corriger la (les) représentation(s) fausse(s).

17 En virage

Une automobile prend un virage. La trajectoire, vue de dessus, est assimilée à une portion de cercle en un point donné.



1. Reproduire le schéma et construire le repère de Frenet au point étudié.

2. a. Projeter le vecteur accélération sur le repère de Frenet.
b. En déduire si la vitesse du véhicule et constante dans le virage.

18 Mouvement circulaire uniformément accéléré

On étudie un mouvement circulaire uniformément accéléré à l'aide du repère de Frenet.

1. a. Rappeler les composantes du vecteur vitesse dans le repère de Frenet.
b. Comment évoluent-elles au cours du temps ?

2. a. Rappeler les coordonnées du vecteur accélération dans le repère de Frenet.
b. Comment évoluent-elles au cours du temps ?

19 Le looping



Un looping est une figure de pilotage aérien que l'on assimilera à une trajectoire circulaire.

1. Rappeler les expression générales des composantes du vecteur accélération dans le repère de Frenet.

2. Les expressions en un point de la trajectoire des vecteurs vitesse et accélération dans ce repère sont, à un instant donné :

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} 40,0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ et } \vec{a} = \begin{pmatrix} -6,50 \\ 106,0 \end{pmatrix} \text{ (en unité SI).}$$

a. Comment évolue la vitesse à l'instant considéré ?
b. Quel est le rayon de la trajectoire ?

20 Un tour de manège

Un manège de 16,0 m de diamètre, animé d'un mouvement circulaire uniforme autour d'un axe vertical, fait un tour complet en 2,40 s.

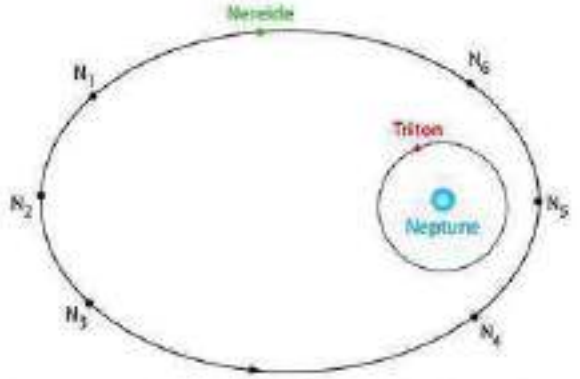
1. Faire un schéma de la situation, vu de dessus. Représenter sur le schéma les vecteurs vitesse et accélération dans le repère de Frenet.

2. a. Calculer la vitesse pour un point se trouvant à la périphérie du manège.
b. Déterminer les composantes de ces vecteurs dans la base du repère de Frenet.

3. Mêmes questions pour un point se trouvant à 4 m de l'axe de rotation.

21 Satellites de Neptune

Les deux premiers satellites découverts autour de Neptune, Néréide et Triton ont des mouvements orbitaux bien différents : Triton a un mouvement circulaire alors que Nereide a un mouvement elliptique.



Dans chacun des cas, le vecteur accélération en chaque point de l'orbite est dirigée vers Neptune.

1. a. Faire un schéma de l'orbite de Triton en représentant quelques vecteurs accélérations au cours du mouvement (sans soucis d'échelle)
b. À l'aide du repère de Frenet, en déduire que Triton a un mouvement uniforme.

2. a. Représenter schématiquement l'orbite de Nereide ainsi que les vecteurs accélération aux points N_1 à N_6.
b. À l'aide du repère de Frenet, déterminer en quel(s) point(s) la vitesse de Nereide augmente, diminue ou reste constante.

c. La vitesse de Nereide est à son maximum en un point appelé aphélie et à son minimum en un point appelé périhélie. En expliquant le raisonnement, déterminer la position de ces deux points.

3 Mouvements particuliers

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Caractériser le vecteur accélération pour les mouvements suivants : rectiligne, rectiligne uniforme, rectiligne uniformément accéléré, circulaire, circulaire uniforme

➥ Acquérir les bases : 22 ➥ S'entraîner : 23 24

22 Caractériser une trajectoire

1. Quelles sont les caractéristiques des vecteurs vitesse et accélération dans le cas d'un mouvement rectiligne ?

2. Quelles sont les caractéristiques des vecteurs vitesse et accélération pour un mouvement uniforme :
– Pour une trajectoire rectiligne ?
– Pour une trajectoire circulaire ?
b. Que peut-on dire du produit scalaire $\vec{a} \cdot \vec{v}$ dans les deux cas ?

23 Saut à ski

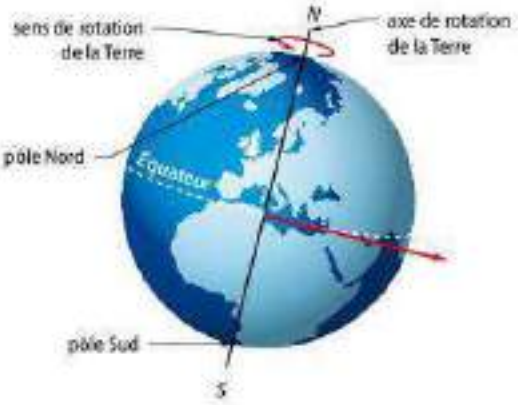
Un skieur s'élance sur une piste de saut à ski. Le mouvement lui permettant de prendre son élan jusqu'au tremplin est rectiligne uniformément accéléré. La partie correspondant au tremplin lui-même est considérée comme une portion de cercle. Pour simplifier, on considérera que la vitesse reste constante dans la portion circulaire.



Reproduire la figure ci-dessus représentant la trajectoire jusqu'au saut et tracer schématiquement les vecteurs accélération aux points A, B, C, D et E.

24 Accélération à l'équateur

Le rayon de la Terre est $R = 6{,}4 \cdot 10^3$ km.

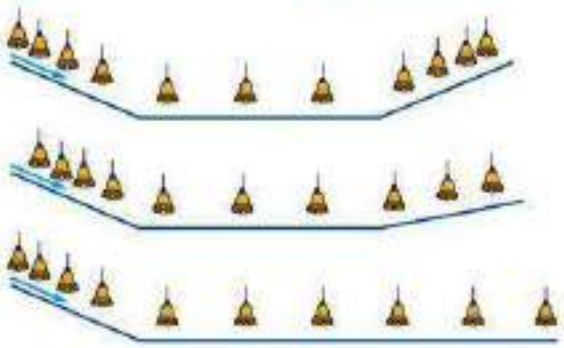


1. On étudie le mouvement d'un point se trouvant à la surface de la Terre, au niveau de l'équateur, dans un référentiel dont l'origine est le centre de la Terre et dont les axes sont orientés vers des étoiles lointaines (référentiel géocentrique)
a. Quel est le type de mouvement de ce point ?
b. Calculer le périmètre de la Terre au niveau de l'équateur. En déduire la vitesse de ce point.
c. Rappeler le lien entre vitesse et accélération pour ce type de mouvement. Décrire le vecteur accélération pour ce point.

2. L'accélération de la pesanteur terrestre vaut $g = 9{,}8$ m · s^{-2}. Comparer le vecteur accélération de la pesanteur à celui

décrit à la question précédente. S'agit-il de la même accélération ? Proposer une explication.

25 Expérience de Galilée



Afin de montrer l'effet des actions mécaniques sur les mouvements, Galilée, célèbre mathématicien et physicien italien du XVII[e] siècle, avait imaginé une expérience qui consistait à faire rouler une boule sur des plans d'inclinaisons variables. Des clochettes tintaient au passage de la boule. Galilée déplaçait alors les clochettes jusqu'à ce que leurs tintements lui paraissent régulier à l'oreille, obtenant une sorte de chronophotographie du mouvement. Les schémas ci-dessus représentent les positions des différentes clochettes lors des expériences réalisées.

1. Décrire les mouvements dans chaque expérience en distinguant toutes les phases.

2. Décrire dans chaque cas évoqué à la question 1 le vecteur accélération de la boule.

3. Le but de cette expérience était de montrer que pour un plan horizontal, le mouvement est rectiligne uniforme.
a. Cela apparait-il sur le schéma proposé ? Justifier.
b. Est-ce le cas dans la réalité ?

26 Limite de résistance à l'accélération

Une centrifugeuse d'entraînement de l'ESA (*European Space Agency*) fait décrire aux spationautes un mouvement circulaire uniforme dont le rayon est de 7,50 m. L'accélération maximale qu'ils subissent atteint 9 g ($1\ g = 9{,}8\ m \cdot s^{-2}$).

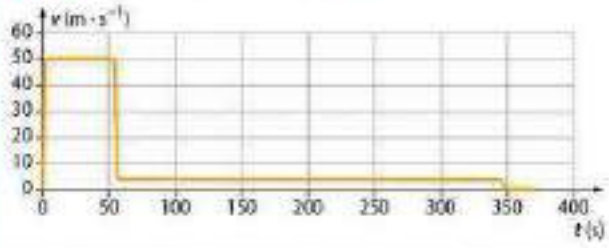


1. Rappeler la relation entre vitesse et accélération pour un mouvement circulaire uniforme.

2. En déduire la valeur de la vitesse maximale du spationaute.

3. Quelle est alors la période de rotation de la centrifugeuse (durée nécessaire pour parcourir le périmètre du cercle) ?

27 Un saut en parachute



La représentation graphique de la vitesse de chute d'un parachutiste lors d'un saut complet est donnée ci-dessous :

Le saut se déroule ainsi : le parachutiste sort de l'avion et effectue une chute libre de 4 000 m à 1 000 m. À cette altitude, il ouvre son parachute et continu sa descente. À la fin de la descente, à quelques mètres du sol, il effectue une manœuvre de ses commandes afin d'atterrir en douceur.

1. Repérer sur le graphique les intervalles de temps correspondants aux 5 phases du saut que l'on nommera.

2. Pour chaque phase, donner le nom du mouvement du parachutiste en justifiant.

3. Pour chaque phase, représenter l'allure des vecteurs vitesse et accélération du parachutiste, sans souci d'échelle.

Faire le point avant d'aller plus loin

PRÉPA BAC

Pour vérifier ses connaissances, répondre aux questions suivantes (sans regarder le cours !)

- Quelles sont les expressions des vecteurs vitesse et accélération dans le repère de Frenet ?
- Décrire le vecteur accélération dans le cas d'un mouvement circulaire uniforme.
- Quelle est la relation entre le vecteur vitesse et le vecteur accélération ?
- Quelle est la relation entre le vecteur position et le vecteur vitesse ?
- Quelles sont les relations entre les coordonnées du vecteur position et les coordonnées du vecteur vitesse ?
- Décrire le vecteur accélération dans le cas d'un mouvement rectiligne uniforme et rectiligne accéléré.

Retrouver ces questions en version numérique — cartes mémos

Exercice résolu

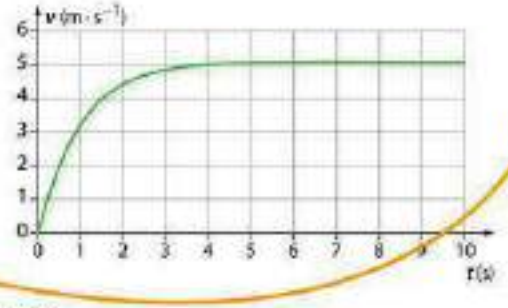
EN AUTONOMIE

28 Mouvement circulaire particulier

Le disque en pierre d'une meule est mis en rotation à l'aide d'un moteur électrique. On appelle $\vec{v}_M$ la vitesse d'un point M se trouvant sur la périphérie du disque.

Le diamètre du disque est $D = 40$ cm.

La représentation graphique de $\|\vec{v}_M\|$ est donnée ci-contre.



1. a. **Décrire** la trajectoire du point M.
b. Comment évoluent les composantes de $\vec{v}_M$ dans le repère de Frenet ?

2. a. Exprimer le vecteur accélération $\vec{a}_M$ dans le repère de Frenet.
b. À partir du graphique, **décrire qualitativement** l'évolution des composantes du vecteur accélération puis calculer la valeur de l'accélération à $t = 10$ s.
c. **En déduire** le type de mouvement du point étudié au cours du temps.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. a. Le point M se trouve à la périphérie d'un disque en rotation autour d'un axe fixe. Sa trajectoire est donc **circulaire**.
b. Le vecteur vitesse a pour expression $\vec{v}_M = v_M\vec{\tau}$ dans le repère de Frenet. Sa composante sur $\vec{\tau}$ **augmente** au cours du temps pour atteindre la valeur maximale d'environ 5 m · s^{-1} à environ $t = 5$ s, sa composante sur $\vec{n}$ **est nulle**.

2. a. L'expression du vecteur accélération dans le cas d'un mouvement circulaire de diamètre D est : $\vec{a}_M = \dfrac{dv_M}{dt}\vec{\tau} + \dfrac{v_M^2}{D/2}\vec{n}$

b. La pente de la tangente à la courbe, et donc la composante sur $\vec{\tau}$ du vecteur accélération **est importante au début puis diminue au cours du temps** pour devenir nulle aux environs de $t = 5$ s.
La composante sur $\vec{n}$ évolue qualitativement de la même façon que v_M : elle **augmente au cours du temps** puis atteint une **valeur maximale** constante à partir de $t = 5$ s.
À $t = 10$ s, il n'y a plus que la composante sur $\vec{n}$ de l'accélération.

On a donc $a_M = \dfrac{v_M^2}{D/2} = \dfrac{5^2}{0{,}2} = 125 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = \mathbf{1{,}2 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}$

c. Lorsque la composante sur $\vec{\tau}$ de l'accélération est nulle, le mouvement est uniforme. On en déduit que de **0 à 5 s environ**, le mouvement est **accéléré** et qu'à partir de $t = 5$ s, il est **uniforme**.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- La dérivée d'une fonction est la **pente de la tangente** à sa représentation graphique.
- Le diamètre permet d'exprimer **la distance à l'axe de rotation** du point M. Il faut être vigilant sur les unités.

LES VERBES D'ACTION

- **Décrire** : ici il s'agit d'une trajectoire. Les mots-clés à utiliser sont : circulaire ou rectiligne uniquement.
- **Décrire qualitativement** : donner les tendances sans fournir de valeur précise.
- **En déduire** : utiliser la réponse précédente pour répondre à celle-ci.

QUELQUES CONSEILS

1. b. Exploiter, si possible, les valeurs figurant sur le graphique lorsqu'elles sont fournies.

1. b. et 2. a. Ne pas oublier que le repère de Frenet a deux vecteurs de base.

2. b. Il faut convertir D en m. La précision du graphique ne permet pas d'exprimer le résultat avec plus de 2 chiffres significatifs.

EXERCICE SIMILAIRE

29 La balançoire

Une balançoire peut osciller librement. À $t = 0$, elle est simplement lâchée avec une amplitude de 30°. La vitesse de la balançoire a pour expression, dans le repère de Frenet :

$\vec{v} = \dfrac{L}{2} \cdot \sin(6{,}28 \times t)\vec{\tau}$ où L est la longueur de la corde de la balançoire.

1. Que vaut la vitesse à $t = 0$?

2. À partir du vecteur vitesse fourni, répondre aux questions suivantes :
a. décrire le type de mouvement de la balançoire entre 0 et 0,5 s ;
b. décrire le type de mouvement de la balançoire entre 0,5 s et 1 s ;
c. en déduire la période des oscillations.

3. a. Donner l'expression du vecteur accélération dans la base de Frenet.
b. À partir de son expression, montrer que le mouvement n'est pas uniforme.



Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Exercice résolu EN AUTONOMIE

30 Vol spatiaux

Pour imaginer voyager dans l'espace, il faut atteindre des vitesses importantes. Imaginons un vaisseau capable d'accélérer à 5 g (5 fois l'accélération de la pesanteur terrestre, soit $a = 49{,}0\ m \cdot s^{-2}$).

On imagine une navette ayant un mouvement rectiligne uniformément accéléré.

1. On considère que la vitesse initiale est nulle. Vérifier que l'expression de la distance parcourue par la navette au bout d'un temps t est $d = \frac{1}{2}kt^2$ où k est une constante dont on donnera la valeur numérique.

2. Uranus, la 8e planète de notre système solaire, est à une distance d'environ $2{,}9 \cdot 10^9$ km de la Terre.
a. **Déterminer** le temps nécessaire pour atteindre cette planète dans ces conditions.
b. Déterminer la vitesse atteinte par la navette au bout de cette durée.

3. Si on voulait simplement atteindre cette planète, il faudrait en réalité un mouvement uniformément accéléré jusqu'à mi-parcours puis un mouvement uniformément ralenti afin d'avoir une vitesse nulle à l'arrivée.
a. **Comparer les vecteurs** accélérations dans les deux phases du mouvement.
b. Quelle serait la durée du voyage ?
c. Quelle serait la vitesse maximale atteinte ?

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ
- La valeur de l'accélération est fournie
- Le type de mouvement est rectiligne à accélération constante.

LES VERBES D'ACTION
- **Vérifier** : à l'aide de l'expression fournie, retrouver une donnée de l'énoncé.
- **Déterminer** : trouver la valeur grâce à un calcul.
- **Comparer les vecteurs** : il faut comparer la norme, la direction et le sens des vecteurs.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. Le mouvement est rectiligne donc $\vec{v}$, $\overrightarrow{OM}$ et $\vec{a}$ sont colinéaires. $\vec{v} = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt}$ et $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$. Ainsi, $v = k \times t$ et $a = k$. L'accélération est donc bien constante : le mouvement est rectiligne uniformément accéléré et k n'est autre que l'accélération, donc $\mathbf{k = 49{,}0\ m \cdot s^{-2}}$.

2. a. Grâce à l'expression fournie par l'énoncé, on en déduit que $t = \sqrt{2\frac{d}{k}}$ soit $t = \sqrt{\frac{2 \times 2{,}9 \times 10^{12}}{49{,}0}} = 3{,}44 \times 10^5\ s = \mathbf{3\ jours\ 23\ h\ 30\ min}$.

b. L'expression de la vitesse a été calculée à la question 1 : $v = k \times t$, d'où $\mathbf{v = 49{,}0 \times 3{,}44 \cdot 10^5 = 1{,}69 \cdot 10^7\ m \cdot s^{-1}}$

3. a. Les deux vecteurs accélération ont même direction, même norme mais des sens opposés.
b. La durée du mouvement accéléré est la même que celle du mouvement ralenti. Ainsi, la durée totale est la somme des deux, soit :
$t = 2\sqrt{2\frac{d/2}{k}} = 2\sqrt{\frac{d}{k}} = 4{,}87 \times 10^5 = \mathbf{5\ jours\ 15\ h\ 09\ min}$
c. La vitesse serait maximale à mi-parcours, soit $v = 49{,}0 \times \frac{4{,}87 \times 10^5}{2}$
$\mathbf{v = 1{,}19 \times 10^7\ m \cdot s^{-1}}$

QUELQUES CONSEILS

1. Préciser que tous les vecteur sont colinéaires avant de dériver la norme du vecteur position (la distance).
2. a. Il faut convertir d en m.
3. b. Puisque les deux phases sont « symétriques », leurs durées sont les mêmes. Ne pas oublier le facteur 2.

EXERCICE SIMILAIRE

31 Le plan incliné en roller

Ambre s'élance en roller dans la pente d'un plan incliné, avec une vitesse initiale (à $t = 0$) de $2{,}2\ m \cdot s^{-1}$. Sa trajectoire est rectiligne ralentie uniformément. L'accélération est $a = 4{,}9\ m \cdot s^{-2}$.

1. Vérifier que la distance parcourue a pour expression : $d = 2{,}2 \times t - \frac{1}{2}kt^2$ où k est une constante numérique que l'on exprimera. Justifier le signe négatif dans l'expression.

2. a. Déterminer le temps nécessaire pour que sa vitesse devienne nulle.
b. Quelle distance aura-elle parcourue ?

3. La longueur du plan incliné est 60 cm. Ambre se laisse redescendre en marche arrière sur le plan incliné avec la même accélération. Quelle sera la durée de la descente du tremplin ? Quelle sera la vitesse atteinte au bas du tremplin ?



S'entraîner pour maîtriser

SAVOIR RÉDIGER

32 Proposer une correction de la solution proposée par un élève à l'énoncé.



Énoncé

Au décollage, Ariane 5 a une accélération constante pendant 1,33 min. Sa vitesse passe de 0 à 500,0 m · s^{-1} pendant cette durée.

1. Calculer l'accélération a subie par la fusée pendant cette durée.

2. Vérifier que l'expression littérale de l'altitude en fonction du temps est : $h = \frac{1}{2}at^2$.

3. Au bout de 2,0 min, sa vitesse est de 2 000 m · s^{-1}.

a. Calculer l'accélération moyenne de la fusée durant la deuxième phase.

b. Le mouvement est-il, *a priori*, uniformément accéléré pendant les deux premières minutes ? Justifier.

Solution proposée par un élève

1. L'accélération subie est : $a = \frac{500}{60 + 33} = 5{,}4\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ⟩ Attention à la conversion de l'unité de la durée

2. J'ai déjà vu cette formule dans un autre exercice du même type donc il s'agit de la bonne expression. ⟩ Une démonstration mathématique est attendue ici.

3. a. L'accélération subie est : $a = \frac{2\,000}{120} = 16{,}6\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ⟩ Ceci est l'accélération moyenne sur les deux phases et non pas sur la deuxième uniquement

b. L'accélération calculée à la question précédente ne dépend pas du temps. Le mouvement est donc uniformément accéléré. ⟩ Les valeurs des accélérations sur les deux phases sont-elles identiques ?

33 Du repère cartésien au repère de Frenet

On considère un point M en rotation autour d'un axe fixe. L'expression du vecteur vitesse de M dans un repère cartésien est :

$$\vec{v}_M = -4{,}8 \times \sin(5{,}0 \times t)\vec{i} + 4{,}8 \times \cos(5{,}0 \times t)\vec{j}$$

1. a. Calculer la norme de la vitesse.

b. Que peut-on dire du mouvement ?

2. À partir de l'expression de $\vec{v}_M$, déterminer l'expression du vecteur accélération $\vec{a}_M$ du point M.

3. On donne les expressions des vecteurs de la base de Frenet :

$$\begin{cases} \vec{\tau} = -\sin(5{,}0 \times t)\vec{i} + \cos(5{,}0 \times t)\vec{j} \\ \vec{n} = -\cos(5{,}0 \times t)\vec{i} - \sin(5{,}0 \times t)\vec{j} \end{cases}$$

a. À partir des expressions ci-dessus, retrouver l'expression du vecteur vitesse dans le repère de Frenet.

b. Retrouver, en justifiant, la norme de la vitesse.

Coup de pouce

- identifier l'un des vecteurs de base dans l'expression du vecteur vitesse ;
- utiliser l'expression théorique du vecteur vitesse dans le repère de Frenet.

c. Exprimer le vecteur $\vec{a}_M$ déterminé à la question 2, dans le repère de Frenet.

d. À partir des résultats trouvés, déterminer le rayon de la trajectoire du point M.

34 Électrophone DÉMARCHES DIFFÉRENCIÉES



Un disque vinyle « 33 tours » est un disque musical de 30 cm de diamètre qui effectue 33 tours complets par minute. Le saphir, qui permet la lecture de l'enregistrement, passe dans un microsillon unique en forme de spirale compacte. Le départ de la piste est sur l'extérieur du disque et lors du fonctionnement, la tête de lecture se rapproche progressivement de l'axe de rotation.

Lorsque l'accélération du saphir sur le disque est forte, la lecture est plus sensible aux chocs : le saphir peut alors parfois sortir du microsillon.

DÉMARCHE EXPERTE

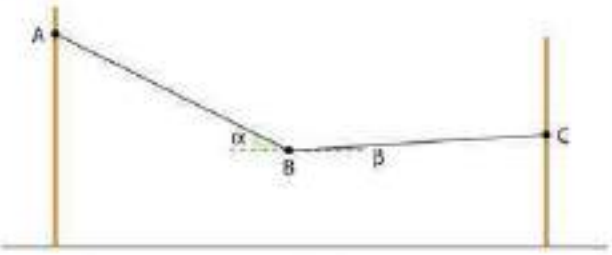
Le saphir présente plus de risque de sortir du sillon lorsqu'il est près ou loin de l'axe ? (On admettra que at est constant durant la lecture.)

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

DÉMARCHE AVANCÉE

1. a. Exprimer la vitesse de passage du saphir dans le microsillon en fonction de R, la distance entre l'axe de rotation et la tête de lecture et T la période de rotation du disque.
b. En déduire si le mouvement du saphir sur le disque est accéléré, ralenti ou uniforme au cours de la lecture.
2. a. Rappeler l'expression de la composante radiale (selon $\vec{n}$) du vecteur accélération dans le repère de Frenet.
b. Si le mouvement était uniforme, comment évoluerait la composante radiale de l'accélération au cours de la lecture ?
c. À partir de la question 1. a., exprimer la composante radiale de l'accélération en fonction de R et T. En déduire comment évolue réellement la composante radiale de l'accélération. (on admettra que la composante tangentielle est constante durant la lecture).
d. En déduire si le saphir présente plus de risque de sortir du sillon lorsqu'il est près ou loin de l'axe.

35 La tyrolienne



Une tyrolienne est une activité de plein air qui consiste à descendre, accroché à une poulie, le long d'un câble tendu entre deux points A et C d'altitudes différentes. Pour simplifier, on considérera que le câble est constitué de deux parties comme schématisé ci-dessus.

Loucas s'élance depuis le point A, sans vitesse initiale,

On peut montrer que la valeur de l'accélération due à la pesanteur terrestre sur un plan incliné d'un angle θ par rapport à l'horizontale est $a = g \cdot \sin\theta$. (avec $g = 9{,}8\ m \cdot s^{-2}$)

1. Décrire le mouvement de Loucas entre les points A et B, puis entre les points B et C

2. Les longueurs AB et BC sont égales et $\alpha > \beta$.
a. Comparer les vecteurs accélérations entre A et B et entre B et C.

Coup de pouce

- Comparer le sens et la direction des vecteurs accélération par rapport aux vecteurs vitesse.
- Comparer les normes des accélérations.

b. La vitesse au point C est-elle nulle ? Justifier.

36 La chaîne du vélo

Un cycliste a une trajectoire rectiligne uniforme. On cherche à étudier le mouvement des maillons de la chaîne du vélo pendant ce mouvement dans un référentiel lié au cadre du vélo.



Le grand disque lié aux pédales porte le nom de plateau, le petit, lié à la roue s'appelle le pignon.

1. a. Comment peut-on qualifier le mouvement d'un maillon lorsqu'il est au contact de l'un des « disques » (plateau ou pignon) ?
b. Même question lorsqu'il n'est pas au contact de l'un des disques.

Dans le cas étudié, la vitesse d'un maillon est de $63{,}0\ cm \cdot s^{-1}$.

2. a. Le rayon du pignon, lié à la roue, est de 2,55 cm. Calculer la composante a_n de l'accélération de la chaîne sur le pignon dans le repère de Frenet.
b. L'accélération de la chaîne sur le plateau est-elle la même ?
c. le mouvement du vélo sur la route est-il accéléré ?

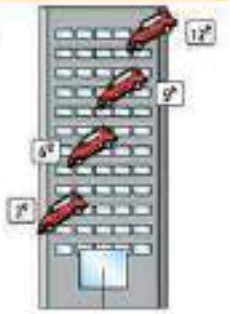
37 Prévention routière

Question 15/40

Un choc à 80 km·h^{-1} contre un obstacle fixe correspond à une chute d'un immeuble :

du 3e étage	A
du 6e étage	B
du 9e étage	C
du 12e étage	D

A B C D



Le document ci-dessus représente un exemple de diapositive l'évaluation du code de la route. Il compare l'impact d'un véhicule roulant à une vitesse constante donnée sur un obstacle fixe avec une chute libre.

La hauteur d'un étage d'immeuble dépend du type de bâtiment : $H = 3{,}3$ m avec une incertitude de 0,7 m.

1. Les deux mouvements décrits sont-ils de même nature ? Justifier.

L'accélération subie par un véhicule en chute libre est celle de la pesanteur : $g = 9{,}8\ m \cdot s^{-2}$.

2. a. Rappeler la relation entre vitesse et accélération.
b. Sachant qu'à $t = 0$ la vitesse est nulle dans le cas de la chute dans le vide, exprimer la vitesse d'un objet en chute libre en fonction du temps.
c. En déduire le temps t_{chute} nécessaire pour atteindre la vitesse de 80 km · h^{-1}.

3. a. Rappeler la relation entre position et vitesse.
b. Vérifier que la distance d parcourue par l'objet en chute libre en fonction du temps est : $d = \frac{1}{2} g \cdot t^2$
c. En déduire la distance parcourue par l'objet en chute libre pendant t_{chute}. En déduire la bonne réponse au test.

38 London Eye



The London Eye, Europe's tallest observation wheel, is an attraction on the south bank of the Thames in London. The wheel has a diameter of 120 metres (394 feet). It rotates at 26 cm (10 in) per second (about 0.9 km/h or 0.6 mph). As a result, one rotation takes about 30 minutes. The rotation is slow enough to allow passengers to get on and off the moving capsules at ground level without stopping the wheel movement.

1. Calculate the real duration of a complete rotation.
2. How can you qualify the movement of the wheel ?
3. Calculate the tangential acceleration and the radial acceleration of a passenger capsules.

39 Exploitation de données TABLEUR-GRAPHEUR

Les composantes du vecteur position d'un point M sont fournies en mètre, au cours du temps dans le tableau suivant :

t	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
x	0	0,24	0,47	0,71	0,94	1,18	1,41
y	0	0,24	0,45	0,64	0,8	0,94	1,06

0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7
1,65	1,88	2,12	2,35	2,59	2,82	3,06	3,29
1,15	1,22	1,26	1,28	1,27	1,24	1,18	1,1

1. À l'aide d'un tableur-grapheur, représenter les coordonnées du point M en fonction du temps.
2. a. L'une des représentation graphique est-elle linéaire ?
   b. En déduire le type de mouvement pour cette coordonnée.
3. a. Calculer puis représenter les valeurs de la dérivée de la seconde coordonnée.
   b. En déduire le type de mouvement pour celle-ci.
4. Préciser, selon la coordonnée, la valeur de la vitesse ou de l'accélération, lorsque cette dernière est constante.

40 La cascade d'Anakin Skywalker

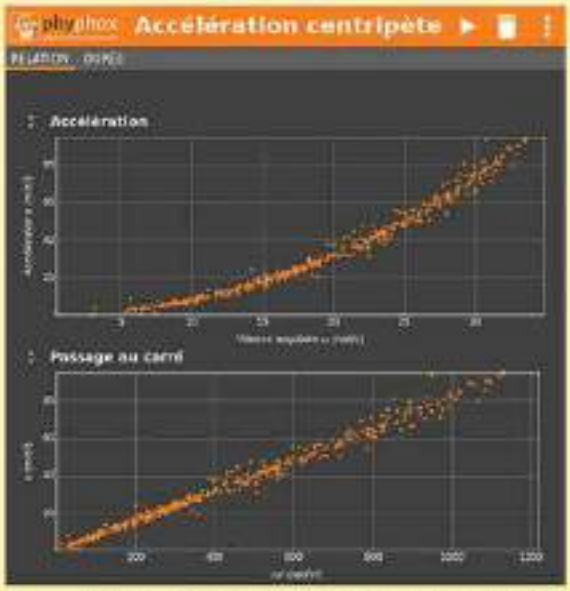
Dans l'épisode 2 de la *Guerre des étoiles*, Anakin Skywalker pourchasse la tueuse à gage Sam Wezell sur Coruscant. Il saute dans le vide et effectue une chute, qui dure 15 secondes dans le film, avant de se rattraper sur le vaisseau de la fugitive en plein vol.

1. On néglige les frottements de l'air dans un premier temps. On imagine que l'accélération de la pesanteur est comparable à celle de la Terre et vaut environ $g = 10\ m \cdot s^{-2}$.
   a. Comment peut-on qualifier le mouvement d'Anakin ?
   b. Déterminer l'expression de la vitesse en fonction du temps. En déduire la vitesse théorique en l'absence de frottement, lorsque Anakin atteint le vaisseau de Wesell.
2. En raison des frottements de l'air, la vitesse se stabilise aux environs de $50\ m \cdot s^{-1}$ environ.
   a. Comment peut-on qualifier le mouvement réel d'Anakin dans les derniers instants de son saut ?
   b. En moins d'un dixième de seconde, il s'agrippe au vaisseau, sa vitesse de chute devient alors nulle. Quelle est la valeur approximative de l'accélération subie ?
   c. Un astronaute entraîné résiste difficilement à une accélération de 9 g et risque l'évanouissement. Commenter le résultat obtenu à la question précédente.

À L'ORAL

41 La physique dans une essoreuse à salade

Un smartphone contient de nombreux capteur dont un accéléromètre et un gyroscope (capable de mesurer des rotations dans l'espace). Une des applications du logiciel phyphox les utilise et permet la mesure simultanée de l'accélération et de la vitesse angulaire. La vitesse angulaire correspond à l'angle de rotation, en radian, parcouru par seconde.



Un smartphone a été placé dans une essoreuse à salade mise en rotation. Les mesures obtenues sont données ci-dessus. Après avoir déterminé la relation entre vitesse et vitesse angulaire pour un mouvement circulaire de rayon R, **expliquer pourquoi cette expérience illustre la relation entre vitesse et accélération pour un mouvement circulaire uniforme.**

42 RETOUR SUR LA PAGE D'OUVERTURE

En prenant l'exemple d'un manège qui tourne à vitesse constante, **préparer un exposé oral qui permet de décrire l'accélération des points du manège.**



PRÉPA BAC

Développer ses compétences

43 Le cyclotron

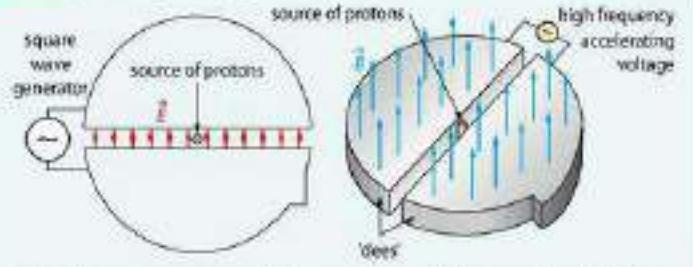
RÉSOLUTION DE PROBLÈME

50 min

APP Rechercher et organiser l'information en lien avec la problématique étudiée

Un cyclotron est un accélérateur de particules qui produit un champ magnétique pour les faire tourner et un champ électrique pour accélérer leurs mouvements.

DOC 1 Principe du cyclotron



Un cyclotron est un accélérateur de particule constitué de deux « D » « dos à dos » plongés dans un champs magnétique $\vec{B}$ uniforme et homogène.

Entre les deux « D », règne un champ électrique $\vec{E}$ homogène qui, grâce à un générateur, change de sens périodiquement tout en gardant la même intensité et la même direction.

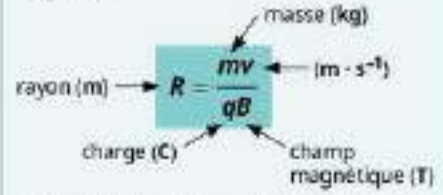
La distance entre les deux « D » est notée L.

À l'instant $t = 0$, un proton est libéré au niveau de la source de proton, sans vitesse initiale.

DOC 2 Champ magnétique

Un champ magnétique $\vec{B}$ est un champ vectoriel qui peut être crée par un aimant ou un électroaimant. La mesure du champ magnétique se fait en tesla (T)

Les champs magnétiques ont une influence sur les particules chargées : une particule de masse m et de charge q qui pénètre dans un champ magnétique uniforme et homogène avec une vitesse $\vec{v}$ orthogonale à $\vec{B}$ sera ainsi animée d'un mouvement circulaire uniforme de rayon R.



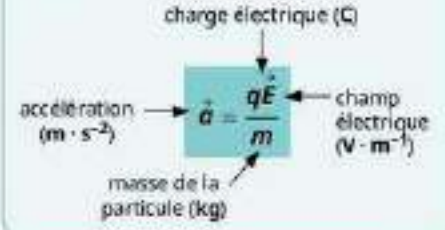
La trajectoire de la particule est dans un plan perpendiculaire à $\vec{B}$.

DOC 4 Le cyclotron, un accélérateur de particules compact

Étant donné que la particule n'est accélérée que pendant son passage entre les deux D, si elle effectue n passages, cela revient à accélérer la particule dans un champ électrique homogène et uniforme sur une distance égale à $n \times L$.

DOC 3 Particule dans un champ électrique

Lorsqu'elle est dans un champ électrique homogène et uniforme, une particule de masse m et de charge q subit une accélération :



DONNÉES

- Masse d'un proton : $m_p = 1{,}67 \times 10^{-27}$ kg
- Charge d'un proton : $q_p = 1{,}60 \times 10^{-19}$ C

$E = 1{,}0 \times 10^7$ V · m^{-1}

$L = 1{,}0$ mm

$B = 2{,}0$ teslas

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Calculer le rayon du demi-cercle décrit par un proton qui pénètre dans l'un des « D » soumis à un champ magnétique de 2,0 teslas, avec une vitesse de $9{,}8 \times 10^6$ m · s^{-1}.
2. Montrer que le rayon des demi-cercles décrits dans les « D » augmente au fur et à mesure du mouvement de la particule.
3. Déterminer l'expression de Δt, le temps nécessaire pour parcourir un demi-cercle, en fonction de m, q et B.
4. Montrer que pour une particule pénétrant dans un champ électrique $\vec{E}$ homogène et uniforme avec une vitesse $\vec{v}$ colinéaire et de même sens que $\vec{E}$, la distance parcourue au cours du temps est :

$$x(t) = \frac{1}{2}\frac{qE}{m}t^2 + v_0 t$$

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

En utilisant tous les documents fournis, prévoir le mouvement et la vitesse de sortie de la particule si on estime qu'elle traverse 50 fois les deux « D ».

Il est attendu une prise d'initiatives et une présentation de la démarche suivie même s'il elle n'a pas abouti.

44 Distance d'arrêt d'un véhicule

RÉSOLUTION DE PROBLÈME

30 min

ANA/RA Proposer une stratégie de résolution

La prévention routière insiste particulièrement sur les dangers de la vitesse au volant. Parmi les conséquences de cette augmentation, on entend souvent : la perte de contrôle lors d'un virage, la violence des chocs et bien sûr l'augmentation de la distance d'arrêt.

DOC 1 Définition de la distance d'arrêt

La distance d'arrêt correspond à la distance parcourue par le véhicule entre le moment où le conducteur voit un danger et le moment où le véhicule est à l'arrêt complet. Cette distance se décompose en deux parties : la distance parcourue pendant le temps de réaction et la distance de freinage, qui dépend de nombreux paramètres (vitesse, masse du véhicule, état des pneumatiques, état de la chaussée, efficacité des freins, etc.).



DOC 2 Distance de sécurité



À 130 km · h^{-1}, la distance de sécurité réglementaire entre les véhicules est de 73 m. Elle correspond au double de la distance parcourue pendant le temps de réaction moyen du conducteur, dans des conditions normales. Le repère donné est qu'il faut « deux lignes de la bande d'arrêt d'urgence entre les véhicules successifs » car celles-ci mesurent 36 m et sont séparées de 14 m, ce qui donne une valeur à peine supérieure.

DOC 3 Distance de freinage



Le calcul de la distance de freinage n'est pas simple. La courbe ci-contre est valable pour un véhicule particulier, avec un état de route et de pneumatiques donné et une efficacité de freinage particulière.

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Quel est le type de mouvement pendant le temps de réaction du conducteur ?
2. Quel est le type de mouvement sur la distance de freinage ?

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

En utilisant tous les documents fournis, prévoir la distance de freinage pour ce véhicule lorsqu'il roule à la vitesse de 60 km · h^{-1}.

Il est attendu une prise d'initiatives et une présentation de la démarche suivie même s'il elle n'a pas abouti.

45 Mouvement à partir de l'accélération

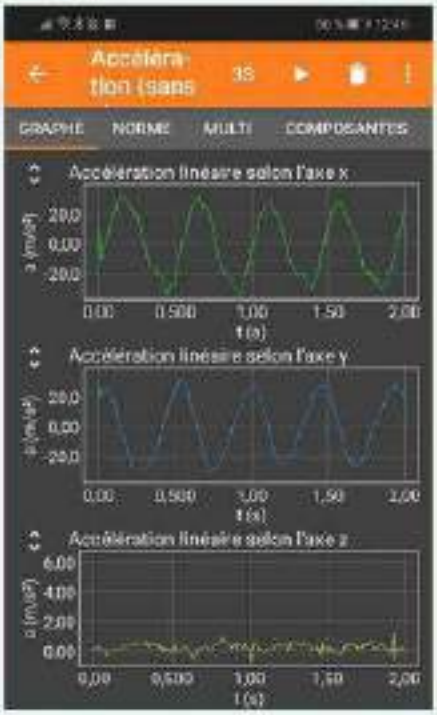
RÉSOLUTION DE PROBLÈME

30 min

COM Présenter une démarche de manière argumentée, synthétique et cohérente.

Les smartphones, contiennent une multitude de capteurs qui leur permettent des fonctionnalités toujours plus évoluées.

DOC 1 L'application Phyphox



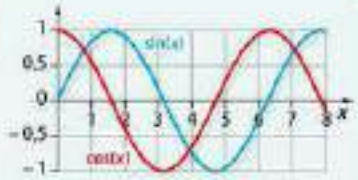
L'application Phyphox, comme d'autres applications scientifiques, permet d'accéder aux mesures faites par l'accéléromètre d'un smartphone.

DOC 2 Les axes de mesures de l'accéléromètre d'un smartphone

Un accéléromètre est un système capable de mesurer une accélération dans les trois directions de l'espace. Il permet, de façon générale de détecter une inclinaison subite, une secousse, une mise en mouvement ou un changement de vitesse ou de direction dans la trajectoire.



DOC 3 Représentations graphiques des fonctions sin(x) et cos(x)



DOC 4 Composantes du repère de Frenet dans un repère cartésien

$$\vec{t} = \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right)\vec{i} + \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right)\vec{j}$$

et $$\vec{n} = \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right)\vec{i} + \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right)\vec{j}$$

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

Un smartphone est mis en mouvement. À $t = 0$, sa vitesse est pratiquement colinéaire à l'axe Ox. La mesure de son accélération a été effectuée au cours du temps, grâce à l'application phyphox (doc. 1). Les mesures ne tiennent pas compte de l'accélération de la pesanteur. On désignera par a_x, a_y et a_z les accélérations linéaires selon les axes x, y et z.

1. Si l'application ne compensait pas l'accélération de la pesanteur, que mesurerait l'accéléromètre ?
2. On s'intéresse à a_x et a_y. Que remarque-t-on pour l'une lorsque l'autre est à un extrémum (minimum ou maximum) ? Représenter le vecteur accélération toutes les 0,2 s à partir de $t = 0$.

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

À l'aide des documents fourni, décrire le plus précisément possible le mouvement réel du smartphone.

Il est attendu une prise d'initiatives et une présentation de la démarche suivie même s'il elle n'a pas abouti.

VERS LE SUP'

46 S'insérer dans la circulation

Un voiture A à l'arrêt à $t = 0$ cherche à s'insérer dans une circulation de voiture. Le véhicule B, se trouvant dans la circulation roule en ligne droite en direction de A à la vitesse constante $v_B = 25\ m \cdot s^{-1}$. L'accélération de la voiture A est constante et vaut $a_a = 3{,}20\ m \cdot s^{-2}$.

1. Exprimer d_B, la distance parcourue par la voiture B à l'instant t.
2. Vérifier que d_A, la distance parcouru par la voiture A à l'instant t s'écrit : $d_a = \frac{1}{2}a_a t^2$.

AB_{min}, est la distance entre A et B à $t = 0$ pour que la voiture A puisse s'insérer à la même vitesse que B, sans la faire freiner et en respectant une distance de sécurité de 50 m.

3. Donner la relation entre d_B, d_A et AB_{min}.
4. Au bout de combien de temps le véhicule A atteint la vitesse du véhicule B.
5. En déduire la distance AB_{min}.

Mouvement sur un plan incliné

Contexte

L'objectif est d'étudier le mouvement d'un cylindre sur un plan incliné grâce à un tableur et de tracer les vecteurs vitesse et accélération grâce à un langage de programmation.

Documents mis à disposition

VIDÉO
Cuves à ondes



Fonctions python utiles

For i in range(1,len(liste)) : Effectue une boucle : La variable *i* prend les valeurs d'indices du deuxième élément de liste jusqu'au dernier.

liste1.append(liste2[i]) : On ajoute à liste1 l'élément d'indice *i* de liste2.

Fonction de la bibliothèque python matplotlib.pyplot

plot(x,y, "ro") : trace les points sur un graphique les abscisses et ordonnées sont contenues dans les listes x et y . Le tracé est constitué de points rouge de forme ronde ("ro" : red 'o')

quiver(x,y,ux,uy,color = "green") : trace un vecteur vert , de composantes (ux,uy) depuis le point (x,y).

Matériel mis à disposition

- Un ordinateur avec logiciel d'acquisition vidéo et logiciel de pointage vidéo et interpréteur python
- Une imprimante
- Un programme en langage python à compléter
- Une webcam sur son support
- Un cylindre
- Un plan incliné
- Une règle en plastique

Travail à effectuer

1. (ANA) **Proposition de protocole expérimental** *(15 min conseillées)*

■ Rédiger un protocole permettant de faire l'enregistrement vidéo du mouvement du cylindre sur le plan incliné, de sorte que la vidéo puisse être correctement mise à l'échelle par le logiciel de pointage.

Être en mesure de présenter un protocole

2. (REA) **Mise en œuvre du protocole expérimental** *(15 min conseillées)*

■ Réaliser la vidéo du mouvement et l'enregistrer sur l'ordinateur en vue de son exploitation.

Être en mesure de présenter l'acquisition informatisée

3. (REA) **Exploitation des mesures effectuées** *(25 min)*

■ À l'aide d'un logiciel de pointage vidéo, repérer les positions successives du centre de masse du cylindre au cours de son mouvement.

1. (REA) **Exploitation graphique**
Exporter les données sous un tableur.
Calculer les composantes du vecteur vitesse et les représenter graphiquement. Modéliser les représentations graphique et **imprimer** les documents.
En déduire les valeurs moyennes a_x et a_y des composantes du vecteur accélération. Expliquer la démarche.

2. (REA) **Exploitation numérique**
Exporter les données au format csv.
Compléter la partie du programme proposé ci-contre, afin que celui-ci, puisse déterminer les composantes du vecteur accélération et le tracer sur le second graphique.

3. **Imprimer** les champs vectoriels et les joindre au compte-rendu. Ranger la paillasse.

```
import matplotlib.pyplot as plt
### Coordonnées des points en fonction du temps ##
fic = open("cylindre_plan_incline.csv","r")       #
donnee=fic.readlines(); t=[]; x=[]; y=[]; l=[t,x,y] #
for point in donnee :                             #
    p=point.split() # Une ligne donne une liste   #
    if p[0][0].isnumeric():                       #
        for i in range(3):                        #
            l[i].append(float(p[i].replace(',','.')))
### Calcul des coordonnées des vecteurs v et a  ###
vx=[] ; vy=[] ; ax=[] ; ay=[]                     #
for i in range(1,len(x)-1):                       #
    vx.append((x[i+1]-x[i-1])/(t[i+1]-t[i-1]))    #
    vy.append((y[i+1]-y[i-1])/(t[i+1]-t[i-1]))    #
# TODO                                            #
### Premier graphique : les vecteurs vitesses  ####
plt.subplot(2,1,1) ; plt.title("Vitesse")         #
plt.quiver(x[1:-1],y[1:-1],vx,vy,color="green")   #
plt.axis('equal') ; plt.plot(x,y,"ro")            #
### Second graphique : les vecteurs accélération ###
plt.subplot(2,1,2) ; plt.title("Accélération")    #
# TODO                                            #
plt.show() # On affiche
```

4. (VAL) **Conclusions** *(5 min)*
Confronter les résultats obtenus aux questions 1 et 2. Conclure sur le type de mouvement.

PISTE POUR LE GRAND ORAL PRÉPA BAC

Pour se préparer à l'Oral
➥ Livret LES CLÉS DU BAC
(en début de manuel)

UNE QUESTION

Quelles informations nous fournit la balistique judiciaire ?

Enjeu de la question

La balistique judiciaire participe à la recherche d'indices sur les scènes de crime. Ces indices sont souvent incontournables dans le cas de reconstitutions, mais également d'identifications.

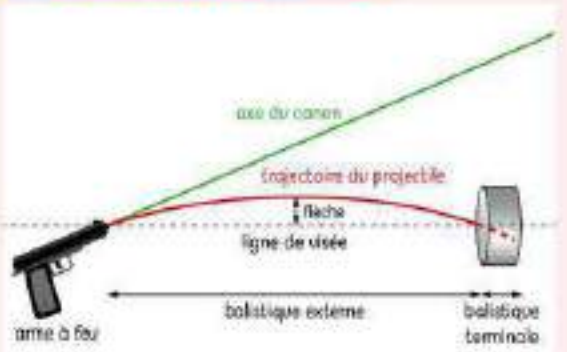
Proposition de plan de présentation

1. Définition du mot « balistique »
2. La balistique externe, ou l'étude des trajectoires des projectiles d'arme à feu.
3. La balistique terminale ou les conséquences du mouvement du projectile .
4. Autres cas d'études de trajectoires : véhicules, objets.

Les mots-clés

trajectoire ▸ vecteur vitesse ▸ ralentissement

Exemple de support de présentation



Deux des trois parties de la balistique d'une arme à feu

QUESTIONS D'APPROFONDISSEMENT POSSIBLES



UN EXEMPLE DE PROJET PROFESSIONNEL

Les enquêtes criminelles profitent de la science pour gagner en précision. La reconstitution d'une scène de crime fait partie intégrante de ce genre d'enquête. La logistique est l'un des aspects important de cette reconstitution. Elle est complétée par de nombreuses autres compétences tant en physique qu'en chimie.

Après le bac : *Concours d'entrée accessibles aux titulaires d'un Bac +2 (technicien) ou bac +5 (ingénieur).*

Autres métiers : *Techniciens en identification criminelle de la Gendarmerie Nationale.*

Les personnels de la police technique et scientifique travaillent dans les laboratoires de la police scientifique. Ils apportent leur soutien aux enquêtes par leur constatations techniques dans des domaines comme la balistique, la microanalyse, la toxicologie...



Avant d'aborder le chapitre

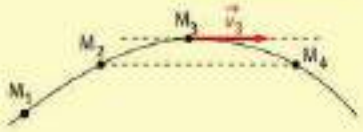
EN AUTONOMIE

LES ACQUIS INDISPENSABLES

1re Enseignement de spécialité

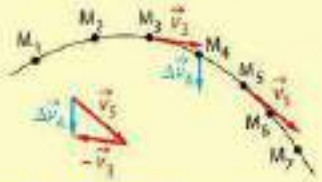
- **Vecteur vitesse** au point M_i

$$\vec{v}_i = \frac{\overrightarrow{M_{i-1}M_{i+1}}}{\Delta t}$$

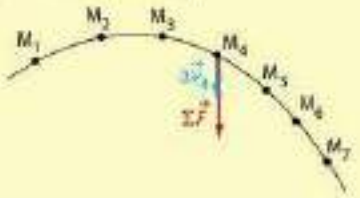


- **Vecteur variation de vitesse** au point M_i

$$\Delta\vec{v}_i = \vec{v}_{i+1} - \vec{v}_{i-1}$$

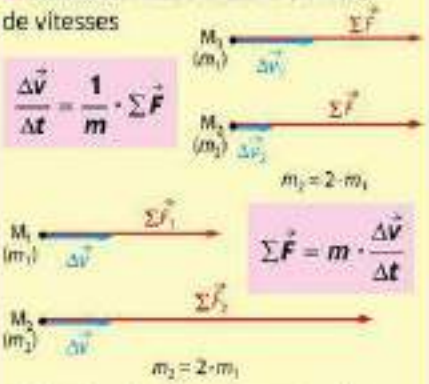


- **Somme des forces** modélisant les actions qui s'exerce au point M_i



- Résultante des forces et variation de vitesses

$$\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \frac{1}{m} \cdot \sum \vec{F}$$



$$\sum \vec{F} = m \cdot \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$$

- Principe d'inertie et contraposée

$\vec{v} = \vec{0}$ ou $\vec{v}$ est constant, $\Delta\vec{v} = \vec{0}$ $\Leftrightarrow$ $\sum \vec{F} = \vec{0}$

$\vec{v}$ non constant ($\vec{v}$ change de direction et/ou de valeur), $\Delta\vec{v} \neq \vec{0}$ $\Leftrightarrow$ $\sum \vec{F} \neq \vec{0}$

- Vecteur accélération au point M_i

$$\vec{a}_i = \frac{\Delta\vec{v}_i}{\Delta t} \quad \text{soit} \quad \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$$

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

Pour chaque situation, rédiger une réponse qui explique en quelques lignes le raisonnement.

SITUATION 1

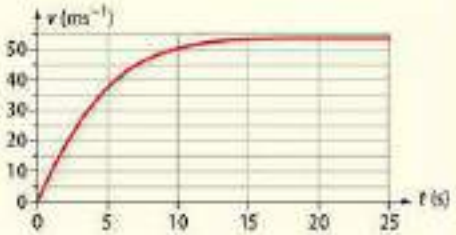
Lors d'un lancer au curling, le mouvement, représenté ci-dessous, se décompose en 3 phases.



Donner les caractéristiques du vecteur somme des forces modélisant les actions mécaniques qui s'exercent sur la pierre de curling lors de ces 3 phases.

SITUATION 2

Lors d'un saut en parachute, l'enregistrement de la vitesse du parachutiste donne le graphe ci-dessous.



Que vaut l'accélération aux dates 0 s et 20 s ?

CHAPITRE

11

PHYSIQUE

Deuxième loi de Newton



Au démarrage, un « reverse bungee » (ou nacelle) est soumis à des actions mécaniques. Comment, en connaissant la valeur des forces qui modélisent ces actions mécaniques des élastiques, est-il possible de déterminer l'accélération de la nacelle ?

→ EXERCICE 5

NOTIONS ET CONTENUS

- Centre de masse d'un système.
- Référentiel galiléen.
- Deuxième loi de Newton.
- Équilibre d'un système.

1. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE

TP

COMPÉTENCES :
(RÉA) Mettre en œuvre les étapes d'une démarche
(VAL) Confronter un modèle à des résultats expérimentaux

Centre de masse d'un système

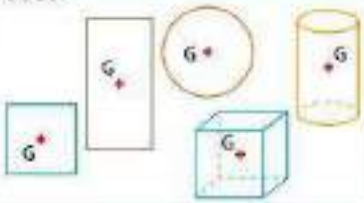
Lorsqu'on décrit le mouvement d'un système et les actions mécaniques qui s'exercent sur lui, nous réduisons le système à un point G appelé centre de masse. Comment localiser ce point ou comment justifier sa position si elle nous est donnée ?

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

- Placer un objet homogène sur le bord de la table et le pousser délicatement jusqu'à le voir basculer.
- À la limite du basculement tracer en s'aidant de l'arête de la table un trait au crayon à papier sur le dessous de l'objet.
- Répéter l'opération, en ayant changé l'objet de position sur la table.
- Repérer le point de contact des différents traits, le centre de masse G, avec une gommette de couleur et une extrémité avec une autre gommette de couleur différente.
- Lancer l'objet (gommettes face caméra) de façon à ce que le mouvement soit dans le plan perpendiculaire à la caméra (FICHE PRATIQUE ➥ p. 586) et enregistrer une vidéo à l'aide d'un smartphone ou d'une webcam afin de réaliser la chronophotographie.

DOC 1 Centre de masse

Le centre de masse G d'un système est le point où se situe la position moyenne de la masse du corps.



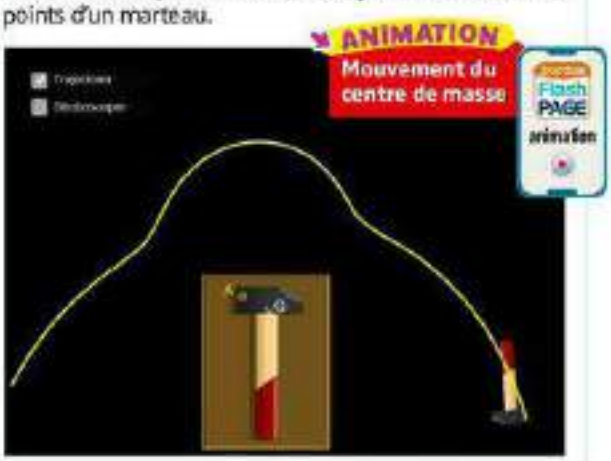
DOC 2 Dispositif expérimental

Des objets de formes différentes ont été choisis.



DOC 3 Mouvement du centre de masse

Une animation pour visualiser la trajectoire de différents points d'un marteau.



EXPLOITATION ET ANALYSE

1 Mettre en œuvre le protocole expérimental pour des objets différents.

2 a. Comparer les positions des centres de masses G pour chaque objet.
b. Que peut-on en déduire de la position du centre de masse de l'objet par rapport à sa forme ?

3 a. Comparer les trajectoires du centre de masse G et de l'autre point du système.
b. Que peut-on en déduire de la trajectoire du centre de masse G d'un système ?

CONCLUSION

Comment peut-on justifier la position du centre de masse d'un système ?

Je réussis si...

- **Je sais faire une acquisition vidéo.**
- **Je sais réaliser une chronophotographie.**
- **Je sais justifier la position du centre de masse.**

COMPÉTENCES :
APP Rechercher et organiser l'information utile
COM Utiliser un vocabulaire adapté

Référentiel galiléen

Un référentiel est un objet par rapport auquel on étudie un mouvement.
Un référentiel est dit galiléen si les lois de la physique de Newton s'appliquent.
Tous les référentiels qui nous entourent sont-ils galiléens ?

DOC 1 Mobile autoporteur

Un mobile autoporteur est un système qui éjecte de l'air afin de créer un coussin d'air et d'éviter les frottements. Il n'est soumis qu'à l'action de la Terre modélisée par son poids $\vec{P}$ tandis que l'action de l'air éjectée est modélisée par la force $\vec{R}$.

Il est relié à un boîtier qui permet de déclencher à intervalle de temps régulier une étincelle sous le mobile. Cette étincelle permet de marquer les différentes positions du système au cours du temps sur une feuille une fois qu'on l'a mis en mouvement.

Réalité

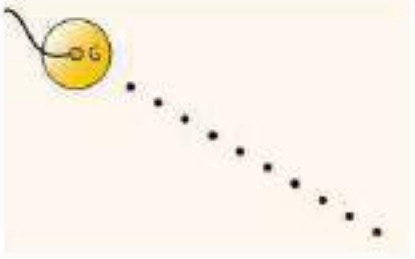


Modélisation



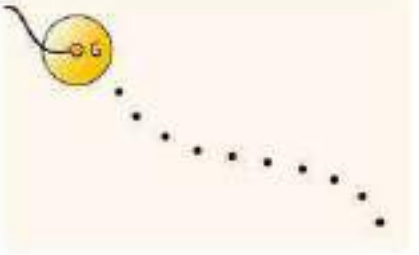
DOC 2 Support immobile

Enregistrement des positions du centre de masse du mobile autoporteur, la table étant fixe.



DOC 3 Support en mouvement

Enregistrement des positions du centre de masse du mobile autoporteur lorsqu'on tire la feuille brusquement.



DOC 4 Principe d'inertie ou 1re loi de Newton

Dans un référentiel galiléen, tout corps persévère dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme si les actions mécaniques qui s'exercent sur lui se compensent.

EXPLOITATION ET ANALYSE

1 Que peut-on dire des forces qui modélisent les actions mécaniques exercées sur le mobile autoporteur ?

2 a. Quel est le référentiel d'étude dans le cas du doc. 2 ?

b. Décrire le mouvement du système dans ce cas.

3 a. Quel est le référentiel d'étude dans le cas du doc. 3 ?

b. Décrire le mouvement du système dans ce cas.

SYNTHÈSE

Qu'est-ce qu'un référentiel galiléen ? Donner des exemples.

Je réussis si...

- **Je sais discuter qualitativement du caractère galiléen d'un référentiel.**

TP

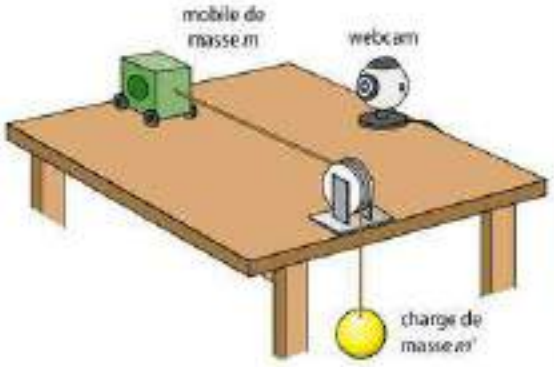
COMPÉTENCES :
(RÉA) Mettre en œuvre les étapes d'une démarche
(VAL) Confronter un modèle à des résultats expérimentaux

La 2e loi de Newton

La loi fondamentale qui permet de décrire le mouvement d'un système lie la somme des forces qui modélisent les actions qui s'exercent sur lui et l'accélération de son centre de masse. Quelle grandeur physique permet de les relier ?

DOC 1 Dispositif expérimental

Le système étudié est un chariot de masse m, posé sur une table plane et horizontale. Il est attaché à un dispositif de tirage à force constante composé d'une charge de masse m' attachée à un fil inextensible passant par une poulie.



La corde exerce une action mécanique sur le mobile dont la valeur de la force est donnée par la relation :

$$F_{\text{corde/mobile}} = \frac{m \cdot m'}{m + m'} \times g$$

RAPPEL

La 2e loi de Newton approchée s'écrit :

$$\sum \vec{F} = m \cdot \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

Donnée : $g = 9{,}8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

- Mesurer les masses m et m'.
- Lâcher le mobile et enregistrer la vidéo du déplacement avec la webcam ou un smartphone.
- À l'aide d'un logiciel de pointage, repérer les positions horizontales successives M_0, M_1, M_2 ... du centre de masse du système (FICHE PRATIQUE ➥ p. 586).
- Basculer les résultats du pointage dans un tableur (FICHE PRATIQUE ➥ p. 564) et les enregistrer sous « chronophotographie.csv ».
- Créer trois colonnes supplémentaires permettant de faire apparaître à chaque instant :
  * la valeur de la vitesse ;
  * la valeur de l'accélération ;
  * la valeur du produit masse m par accélération.
- Tracer les vecteurs accélérations avec le programme Python.

DOC 2 Programme Python

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as n
#  Coordonnées des points du solide en fonction du temps
fic = open("chronophotographie.csv",'r')
donnee=fic.readlines()
t=[] x=[] ; y=[] ;
for point in donnee :
  point=point.split() # Transforme une ligne en une liste
  if point[0][0].isnumeric(): #Pour passer l'en-tête du fichier
    t.append(float(point[1].replace(',','.')))
    x.append(float(point[2].replace(',','.')))
    y.append(float(point[3].replace(',','.')))
# Calcul des coordonnées vx et vy du vecteur vitesse
vx=[0] ; vy=[0] ; v=[]
for i in range(1,len(x)-1):
  vx.append((x[i+1]-x[i-1])/((t[i+1]-t[i-1])
  vy.append((y[i+1]-y[i-1])/((t[i+1]-t[i-1])
  v.append((vx[-1]**2+vy[-1]**2)**0.5)
# Calcul des coordonnées ax et ay du vecteur accélération
ax=[0] ; ay=[0]  ; a=[]
for i in range(2,len(vx)-1):
  ax.append((vx[i+1]-vx[i-1])/((t[i+1]-t[i-1])
  ay.append((vy[i+1]-vy[i-1])/((t[i+1]-t[i-1])
  a.append((ax[-1]**2+ay[-1]**2)**0.5)
# Tracé des champs de vecteurs:
vec_v=plt.quiver(x[:-1],y[:-1],vx,vy,color="green")
plt.quiverkey(vec_v,X=0.7, Y=1.05, U=5e4,label='Vitesse')
vec_a=plt.quiver(x[1:-2],y[1:-2], ax,ay, color="blue")
plt.quiverkey(vec_a,X=0.2, Y=1.05, U=1e-2,label='Accélération')
plt.plot(x,y,"ro") ; plt.axis('equal')
plt.show()
```

EXPLOITATION ET ANALYSE

1 Mettre en œuvre le dispositif expérimental pour deux chariots de masses différentes.

2 a. Donner les caractéristiques des forces modélisant les actions mécaniques qui s'exercent sur le système.

b. Représenter les vecteurs forces au centre de masse du système pour les deux chariots.

c. Tracer et donner les caractéristiques de la résultante des forces.

3 Que peut-on dire du vecteur accélération ?

CONCLUSION

Quelle est la relation vectorielle qui lie la somme des forces qui modélisent les actions mécaniques s'exerçant sur le système et le vecteur accélération de son centre de masse ?

Je réussis si...

- Je sais réaliser et exploiter une chronophotographie.
- Je sais en déduire la représentation des vecteurs accélérations.
- Je sais utiliser la 2e loi de Newton.

4. RÉSOLUTION DE PROBLÈME

COMPÉTENCES :
(RÉA) Utiliser un modèle
(VAL) Confronter un modèle à des résultats expérimentaux

Le téléski

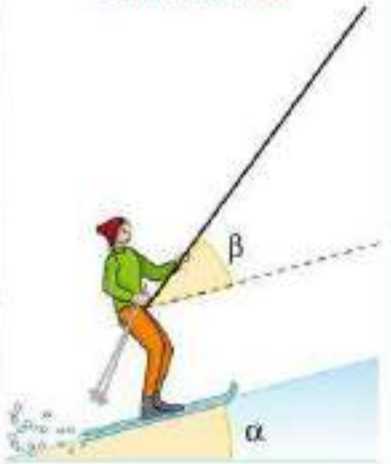
Le téléski est un dispositif permettant à un skieur de remonter une pente en étant tiré par une perche. Lors d'un redémarrage en pleine ascension, comment déterminer la valeur de l'accélération ?

DOC 1 Situation réelle et schématisation

Une skieuse de masse 80 kg avec son équipement remonte une pente enneigée plane.
La piste fait un angle $\alpha = 15°$ avec l'horizontale et la perche un angle $\beta = 35°$ avec la piste.

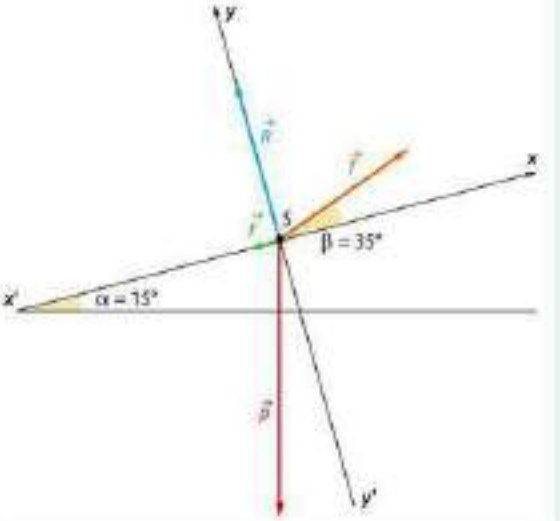
Réalité **Schématisation**





DOC 2 Modélisation du système

Le système est soumis à différentes actions mécaniques modélisées par des forces dont les vecteurs sont représentés par le schéma ci-dessous.



DOC 3 La 2e loi de Newton

Dans un référentiel galiléen, la somme vectorielle des forces modélisant les actions mécaniques exercées sur le système est égale au produit de la masse du système par le vecteur accélération de son centre de masse :

$$\sum \vec{F}_{\text{extérieur/système}} = m\vec{a}_G$$

DONNÉES

- On étudie le système dans son mouvement rectiligne accéléré.
- Les forces sont supposées constantes et de valeurs : $f = 100$ N ; $T = 470$ N et $R = 490$ N.
- L'intensité de pesanteur est de 9,8 m · s^{-2}.

EXPLOITATION ET ANALYSE

1 a. Définir le système et le référentiel d'étude.
b. Établir le bilan des actions mécaniques qui s'exercent sur le système.

2 a. Tracer les forces suivant une échelle judicieusement choisie.
b. Construire le vecteur résultante des forces (FICHE MÉTHODE ➥ p. 555).

PROBLÉMATIQUE

On veut vérifier que le mouvement est bien rectiligne accéléré et déterminer la valeur de cette accélération

Proposer une démarche permettant de déterminer la valeur de l'accélération par deux méthodes différentes.

Je réussis si...

- **Je sais utiliser la deuxième loi de Newton.**
- **Je sais déduire le vecteur accélération du centre de masse, les forces appliquées au systèmes étant connues**

1 Centre de masse d'un système

Définition

Le **centre de masse** G d'un système est le point où se situe la position moyenne de la masse du corps.
Il correspond au **point central** de toutes les **masses** constituant le système.

Position du centre de masse d'un système

Dans un champ de pesanteur uniforme, le centre de masse se situe au centre de gravité (c'est pour cela qu'il est généralement nommé G) qui est le barycentre des masses.

Si le système est homogène (FIG. 1), le **centre de masse** se situe au centre géométrique du système.

Si le système n'est pas homogène, il se situe du côté où le système est le plus massique.

Remarque. Expérimentalement, on peut déterminer le centre de masse par :
- le point d'intersection des droites d'actions du poids lorsque le solide est suspendu suivant différents points (FIG. 2) ;
- le point d'intersection des droites suivant lequel le système bascule dans le vide lorsqu'il est initialement sur un support ;
- le point particulier du système qui décrit une trajectoire plus simple que les autres. (FIG. 3).

Propriété du centre de masse

Le **centre de masse G** d'un système est le point qui décrit la **trajectoire la plus simple** lorsque le système est en mouvement.

Remarque. On assimile un système à un point matériel G car ce point est en fait le centre de masse du système. C'est en ce point qu'on construit les vecteurs force, vitesse et variation de vitesse.
Le mouvement du centre de masse G du système est appelé mouvement d'ensemble. Nous perdons des informations sur le mouvement du reste du système mais cela se justifie non parce que le système est petit mais parce que l'on peut considérer ce point comme le point d'application de toutes les forces modélisant les actions mécaniques qui s'exercent sur lui.

2 Référentiel galiléen

Notion de référentiel

L'objet de référence par rapport auquel on étudie un mouvement est appelé **référentiel**.

Référentiel galiléen

Les lois de Newton qui régissent l'ensemble de la mécanique du point ne sont valables que dans des référentiels appelé **référentiels galiléens**.

Par définition, un **référentiel** est dit **galiléen** si le principe d'inertie (ou 1re loi de Newton) est vérifié dans ce référentiel.

Tout référentiel immobile ou en mouvement de translation uniforme par rapport à un référentiel galiléen est alors lui-même galiléen.

UN PONT VERS LES MATHS

Le barycentre noté G entre deux points matériels A de masse m_1 et B de masse m_2 est tel que :

$$m_1\overrightarrow{GA} + m_2\overrightarrow{GB} = \vec{0}$$

Pour un objet quelconque on le décompose en une infinité de points matériels M_i et le barycentre ou centre de masse G est tel que :

$$\sum_{i=1}^{n} m_i\overrightarrow{GM_i} = \vec{0}$$

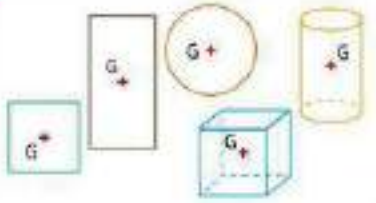


FIG. 1 Positions des centres de masses pour différents types de systèmes homogènes.

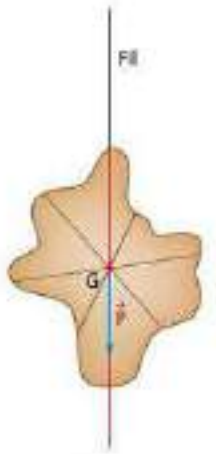


FIG. 2 Le centre de masse G se trouve à l'intersection des directions du poids (verticales) pour différents points d'accroche du système.

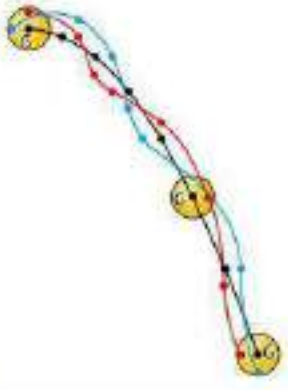


FIG. 3 Trajectoires de trois points d'une balle de tennis en mouvement.

Exemples de référentiels galiléens

Le **référentiel héliocentrique** (repère au centre du Soleil et axes vers 3 étoiles lointaines fixes) est considéré comme galiléen (FIG. 4).

Le **référentiel géocentrique** (repère au centre de la Terre et axes vers 3 étoiles lointaines fixes) est alors galiléen si on étudie le **mouvement d'un système ne dépassant pas quelques heures** afin de pouvoir négliger la rotation de la Terre autour du Soleil (FIG. 4).

Le **référentiel terrestre** (repère à la surface de la Terre et pointant vers 3 directions de l'espace) est alors galiléen si on étudie le **mouvement d'un système ne dépassant pas quelques minutes** afin de pouvoir négliger la rotation de la Terre sur elle-même.

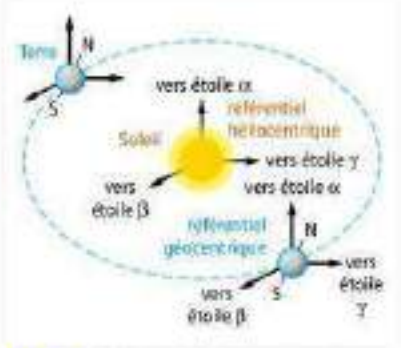


FIG. 4 Référentiels héliocentrique et géocentrique.

Référentiels non galiléens

Inversement, si un système au repos est soumis à des actions mécaniques qui ne se compensent pas dans un référentiel, alors le principe d'inertie (1re loi de Newton) ne s'applique pas et le référentiel n'est pas considéré comme galiléen.

Tout référentiel en mouvement de translation accéléré ou ralenti, ou en rotation par rapport à un référentiel galiléen n'est alors pas lui-même galiléen (FIG. 5).



Sur le manège tournant, ces nacelles s'inclinent par rapport à la verticale pour garder l'équilibre. Les actions mécaniques qui s'exercent sur elles ne se compensent pas.

FIG. 5 Référentiel du manège non galiléen.

3 Deuxième loi de Newton

Énoncé

Pour un système de masse constante, dans un référentiel galiléen, la somme vectorielle des forces modélisant les actions mécaniques exercées sur le système est égale au produit de la masse du système par le vecteur accélération de son centre de masse :

$$\sum \vec{F}_{\text{extérieur/système}} = m\,\vec{a}_G$$

résultante des forces ; masse du système ; accélération du centre de masse

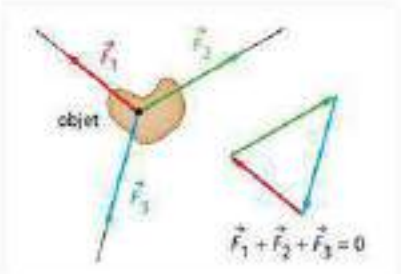
Équilibre d'un système

Un système est à l'équilibre dans un référentiel donné (FIG. 6) si et seulement si le vecteur vitesse du centre de masse est nul et son accélération est nulle :

$$\vec{v}_G = \vec{0} \text{ et } \vec{a}_G = \vec{0}$$

D'après la 2e loi de Newton, la résultante des forces est donc nulle : $\sum \vec{F} = \vec{0}$.

Attention, si les forces se compensent, le vecteur accélération de son centre de masse étant nul, le système peut aussi être en mouvement rectiligne uniforme (principe d'inertie) dans le référentiel donné.



Les directions des vecteurs forces modélisant ces actions sont concourantes au centre de masse.

FIG. 6 Système à l'équilibre.
$\vec{v}_G = \vec{0} \rightarrow \sum \vec{F}_{\text{extérieur/système}} = \vec{0}$

Des forces à l'accélération

À l'aide de la 2e loi de Newton, on détermine le vecteur accélération du centre de masse si les forces modélisant les actions mécaniques appliquées au système sont connues :

- définir le système et le référentiel d'étude, et faire le bilan des actions mécaniques qui s'exercent sur le système ;
- représenter en G, à l'échelle donnée, les forces et effectuer leur somme afin de déterminer la résultante des forces $\sum \vec{F}_{\text{extérieur/système}}$;
- mesurer la valeur de la résultante et diviser par la masse du système pour déterminer la valeur de l'accélération. Direction et sens étant donnés par le vecteur résultante.

EXEMPLE

Le mobile (FIG. 1) est modélisé par un ressort de constante de raideur $k = 20$ N/m. L'enfant allonge le ressort d'une distance $h = 10$ cm par rapport à sa longueur à vide en tirant sur le jouet de masse $m = 150$ g avant de le lacher. On désire connaître l'accélération du jouet.

On appelle force de rappel d'un ressort la force qui modélise l'action du ressort sur le jouet, on détermine sa valeur par le produit de la constante de raideur et de l'allongement du ressort.

$P = m \times g = 0{,}150 \times 9{,}8 = 1{,}5$ N

$F = k \times h = 20 \times 10 \cdot 10^{-2} = 2{,}0$ N

D'après la 2e Loi de Newton : $\vec{P} + \vec{F} = m\,\vec{a}_G$, on trace en choisissant une échelle.

Ou en projetant sur l'axe vertical orienté vers le haut : $P - F = m\,a_G$

D'où $a_G = \dfrac{F - P}{m} = \dfrac{2{,}0 - 1{,}5}{0{,}150} = 3{,}3$ m · s^{-2}

Le vecteur $\vec{a}_G$ est orienté vers le haut tout comme la résultante des forces $\Sigma\vec{F}$.



FIG. 1 Mobile pour enfant et sa modélisation par un ressort à spire non jointive.

De l'accélération aux forces

À l'aide de la 2e loi de Newton, on peut, connaissant l'accélération du système, déterminer la valeur de la résultante des forces qui modélisent les actions mécaniques s'exerçant sur le système afin de pouvoir en déduire la valeur d'une de ces forces. Pour cela il convient de :

- déterminer le vecteur accélération soit par construction graphique à l'aide des vecteurs vitesses soit à l'aide des données (valeurs de vitesses, tableau, graphe...) ;
- multiplier la valeur de l'accélération par la masse du système ;
- tracer, avec l'échelle donnée, la résultante des forces et déterminer les caractéristiques d'une des forces à partir des autres forces connues.

EXEMPLE

Une voiture avec chauffeur (FIG. 8) de masse 1 000 kg en mouvement rectiligne uniforme freine brusquement. On veut déterminer la valeur des frottements.



La chronophotographie ($\tau = 0{,}50$ s) correspond au centre de masse du système vu de dessus. L'échelle permet de mesurer $\Delta v_3 = 3{,}6$ m · s^{-1}

Or par définition $\vec{a} = \dfrac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$ d'où $\vec{a}_3 = \dfrac{\Delta\vec{v}_3}{\Delta t} = \dfrac{\vec{v}_4 - \vec{v}_2}{2\tau}$.

La valeur de l'accélération est donc de $a_3 = \dfrac{3{,}6}{2 \times 0{,}50} = 3{,}6$ m · s^{-2}

D'après la 2e Loi de Newton $\Sigma\vec{F}_{\text{extérieur/système}} = m\,\vec{a}_G$ d'où $\vec{P} + \vec{R} + \vec{F} = m\,\vec{a}_G$

Comme $\vec{P}$ et $\vec{R}$ se compensent, on a $\vec{F} = m\,\vec{a}_G$ et la valeur de F est accessible par $F = m \times a_3 = 1\,000 \times 3{,}6 = 3{,}6.10^2$ N.



FIG. 8 Bilan des forces appliquées au centre de masse du système (voiture + chauffeur).

Il est parfois nécessaire de projeter les vecteurs représentant les forces sur un axe vertical ou horizontal.

EXEMPLE

Lorsqu'un skieur s'élance sur une piste de ski (FIG. 9). La résultante des forces correspond à la direction et au sens du mouvement ce qui correspond à la direction et au sens de l'accélération d'après la 2e loi de Newton $\vec{P} + \vec{R} + \vec{f} = m\,\vec{a}_G$

Ici $\vec{P}$ et $\vec{R}$ ne se compensent pas.

Si on projette cette relation sur l'axe perpendiculaire à la piste (y'y) alors $R - P \cdot \cos\alpha = 0$ puisque l'accélération est nulle suivant cette direction donc $R = P \cdot \cos\alpha = m \cdot g \cdot \cos\alpha$.

Si on projette cette relation sur l'axe de la piste (x'x) alors $P \cdot \sin\alpha - f = m \cdot a_G$ donc $f = P \cdot \sin\alpha - m \cdot a_G = m \cdot g \cdot \sin\alpha - m \cdot a_G = m\,(g \cdot \sin\alpha - a_G)$.



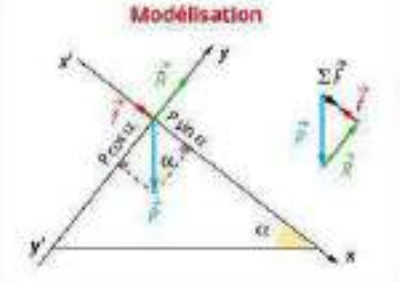


FIG. 9 Bilan des forces appliquées au centre de masse d'un skieur en descente.

1 Centre de masse d'un système

- Le **centre de masse G** d'un système est le point où se situe la position moyenne de la masse du corps.
- Si le système est homogène, le centre de masse se situe au centre géométrique.



- **Le centre de masse G** d'un système correspond au point qui décrit la trajectoire la plus simple lorsque le système est en mouvement.

2 Référentiel galiléen

- Par définition, un **référentiel** est dit **galiléen** si le principe d'inertie (ou 1re loi de Newton) est vérifié dans ce référentiel.



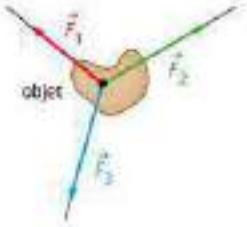
- Tout référentiel en mouvement de translation accéléré ou ralenti, ou en rotation par rapport à un référentiel galiléen n'est alors pas lui-même galiléen.

3 Deuxième loi de Newton

masse du système

résultante des forces → $\sum \vec{F}_{\text{extérieur/système}} = m\,\vec{a}_G$

accélération du centre de masse



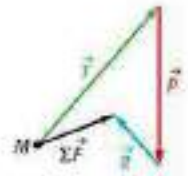


Équilibre d'un système

$\vec{v}_G = \vec{0} \rightarrow \sum \vec{F}_{\text{extérieur/système}} = \vec{0}$

Des forces à l'accélération

- Représenter à l'échelle, les forces et tracer la résultante des forces.
- Appliquer la **2e loi de Newton** afin de déterminer le vecteur accélération.



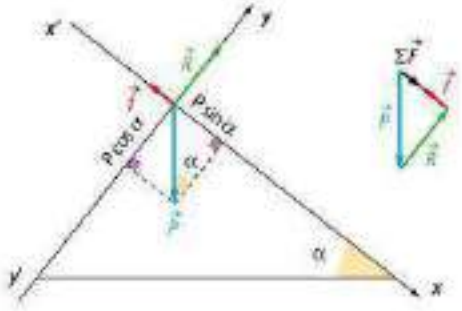
Somme des forces qui modélisent les actions mécaniques qui agissent sur le skieur



Produit de la masse du système par le vecteur accélération de son centre de masse

De l'accélération aux forces

- Déterminer (avec une chronophotographie, les données des vitesses, une courbe $v = f(t)$, etc.) les caractéristiques du vecteur accélération.
- Appliquer la 2e loi de Newton, afin de déterminer la résultante des forces.
- Par projection sur un ou deux axes, on peut en déduire les valeurs de certaines forces.



Vérifier l'essentiel EN AUTONOMIE

Pour chaque question, choisir la ou les bonnes réponses. ➡ SOLUTIONS EN PAGE 593

Flash PAGE corrigés détaillés

Flash PAGE QCM interactifs

1 Centre de masse d'un système

	A	B	C
1 Le centre de masse d'un système :	est le point le plus massique du système.	est le point où se situe la position moyenne de la masse du corps.	est n'importe quel point du système.
2 Sur le dessin, le centre de masse est le point G car : 	il est à la position moyenne de la masse du corps.	il est au centre du disque homogène.	il correspond à la trajectoire la plus simple du système.
3 Pour ce système homogène le centre de masse est : 	le point A.	le point B.	le point C.

2 Référentiel galiléen

	A	B	C
4 Un référentiel est galiléen si :	la 1re loi de Newton est vérifiée.	la 1re loi de Newton n'est pas vérifiée.	aucune loi de Newton n'est vérifiée.
5 Un avion peut être considéré comme référentiel galiléen si :	il est en mouvement rectiligne accéléré par rapport à un référentiel galiléen.	il est immobile par rapport à un référentiel galiléen.	il est en mouvement rectiligne uniforme par rapport à un référentiel galiléen.
6 Lesquels de ces référentiels sont galiléens ?	Le référentiel héliocentrique.	Le référentiel terrestre pour étudier un mouvement durant quelques heures.	Le référentiel terrestre pour étudier un mouvement durant quelques minutes.

3 Deuxième loi de Newton

	A	B	C
7 La 2e loi de Newton :	n'est valable que dans un référentiel galiléen.	s'écrit $\Sigma \vec{F}_{\text{extérieur/système}} = \vec{0}$	s'écrit $\Sigma \vec{F}_{\text{extérieur/système}} = m\vec{a}_G$
8 Le vecteur résultante des forces et le vecteur accélération du centre de masse :	ont même valeur.	ont même direction.	ont même sens.
9 Si un système est à l'équilibre, alors :	$\vec{v}_G = \overrightarrow{cte} \rightarrow \Sigma \vec{F} = \vec{0}$	$\Sigma \vec{F} = \vec{0} \rightarrow \vec{v}_G = \vec{0}$	$\vec{v}_G = \vec{0} \rightarrow \Sigma \vec{F} = \vec{0}$

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Acquérir les bases

1 Centre de masse d'un système

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Justifier qualitativement la position du centre de masse d'un système, cette position étant donnée

➥ Acquérir les bases : 11 ➥ S'entraîner : 27

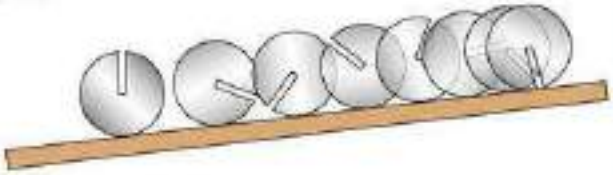
10 Jeu d'anneaux

Dans ce jeu il faut lancer un anneau autour du bâton. Le centre de masse de l'anneau est le point G.

Est-il possible qu'il ne soit pas sur l'objet ? Justifier sa position.



11 Recherche du centre de masse

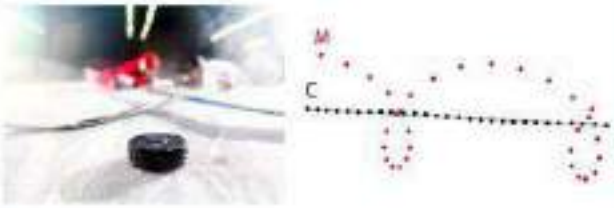


Un disque entaillé roule sur une pente. Justifier que le centre de masse du système soit au centre du disque.

12 Palet de hockey

On lance sur la glace un palet de hockey muni de deux repères visuels, un en son centre (C), l'autre en périphérie (M). Le mouvement du palet est filmé.

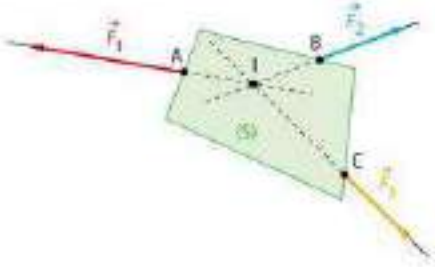
À l'aide d'un logiciel approprié, on obtient pour chacun des points C et M une trajectoire.



1. Décrire les trajectoires des points M et C.
2. Quel point est le centre de masse ?

13 Solide en équilibre

Justifier que le centre de masse du solide en suspension ci-dessous soit le point I.



2 Référentiel galiléen

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Discuter qualitativement du caractère galiléen d'un référentiel donné pour le mouvement étudié

➥ Acquérir les bases : 14 ➥ S'entraîner : 32

14 Référentiels galiléens courants

Citer des référentiels courants et les conditions dans lesquelles ils peuvent être considérés comme galiléens.

15 Le bon référentiel

Pour chaque situation suivante, choisir un référentiel galiléen :

a. Un skieur descendant une piste ;
b. Jupiter tournant autour du Soleil ;
c. la Lune tournant autour de la Terre ;
d. un train sortant de la gare.

16 Pilote de course

Un pilote s'élance de la ligne de départ d'un grand prix.



1. Rappeler la définition d'un référentiel.
2. Dans quelle condition est-il considéré comme galiléen ?
3. a. Le référentiel terrestre est-il ici considéré comme galiléen ?
   b. Quel est le mouvement du pilote dans ce référentiel ?
   c. En déduire si les actions mécaniques qui s'exercent sur lui se compensent.
4. a. Le référentiel voiture est-il ici considéré comme galiléen ?
   b. Quel est le mouvement du pilote dans ce référentiel ?
   c. En déduire si les actions mécaniques qui s'exercent sur lui se compensent.

17 Thomas Pesquet à bord de l'ISS

Le spationaute français Thomas Pesquet a fait un séjour à bord de la station spatiale internationale de novembre 2016 à juin 2017.

Il réalise 2 h et demi de sport chaque jour : course sur tapis, vélo d'entraînement...



1. Dans quel référentiel est-il immobile ? ce référentiel est-il galiléen ?
2. Le référentiel terrestre est-il ici galiléen pour étudier le mouvement de l'astronaute ?
3. Le référentiel géocentrique est-il ici galiléen pour étudier le mouvement de Thomas Pesquet ?

3 Deuxième loi de Newton

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Deuxième loi de Newton

- Utiliser la deuxième loi de Newton dans des situations variées pour en déduire le vecteur accélération du centre de masse, les forces appliquées au système étant connues.

➥ Acquérir les bases : 18 ➥ S'entraîner : 20 22 40

Équilibre d'un système

- Utiliser la deuxième loi de Newton dans des situations variées pour en déduire la somme des forces appliquées au système, le mouvement du centre de masse étant connu.

➥ Acquérir les bases : 20 ➥ S'entraîner : 36 37 41

18 Somme de forces

1. Construire le vecteur somme des forces représentant la résultante des forces au centre de masse G pour les deux systèmes suivants.



a. b.

2. Quel système peut être à l'équilibre et dans quelle condition ?

3. Quelle est la direction et le sens de l'accélération du centre de masse du système qui n'est pas à l'équilibre ?

19 Le curling

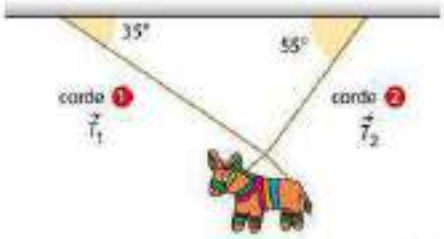
On étudie une pierre de curling dans le référentiel terrestre supposé galiléen.

1. La pierre est à l'arrêt.
a. Que vaut la résultante des forces $\sum \vec{F}$ qui modélisent les actions mécaniques s'exerçant sur la pierre ?
b. La pierre est-elle à l'équilibre ?

2. La pierre est en mouvement rectiligne uniforme.
a. Que vaut la résultante des forces $\sum \vec{F}$ qui modélisent les actions mécaniques s'exerçant sur la pierre ?
b. La pierre est-elle à l'équilibre ?

20 La piñata

Lors de l'anniversaire de Tanya sa maman a accroché une piñata comme suit :



1. Que peut-on dire du vecteur vitesse et accélération du centre de masse de la piñata dans le référentiel terrestre supposé galiléen.

2. En déduire la valeur de la résultante des forces appliquées au système. Justifier.

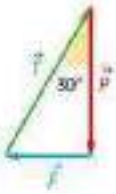
3. La piñata est-elle à l'équilibre ?

21 Boule de fer

Une boule métallique de masse 400 g est accrochée à un fil inextensible. Un aimant exerce une action d'attraction à distance. La boule est immobile dans le référentiel terrestre supposé galiléen.



Le tracé des forces représentant les actions mécaniques mises bout à bout donne le schéma suivant :



1. Que peut-on dire de la somme des forces qui s'exercent sur la boule ?

2. Justifier que la boule soit à l'équilibre ?

3. Calculer la valeur du poids et en déduire par des relations trigonométriques les valeurs des deux autres forces :

Donnée : *Intensité de pesanteur* $g = 9{,}8\ m \cdot s^{-2}$.

22 Saut en parachute

Un parachutiste avec son équipement ($m = 90$ kg) vient de sauter de l'avion. Dans le référentiel terrestre supposé galiléen, lors les premiers instants après le saut les actions mécaniques qui s'exercent sur lui sont modélisés par le poids $\vec{P}$ et la force de frottements $\vec{f}$.



1. Donner les caractéristiques du vecteur résultante des forces $\sum \vec{F}$.

2. En déduire la valeur du vecteur accélération.

Donnée : *Intensité de pesanteur* $g = 9{,}8\ m \cdot s^{-2}$.

23 Poussée au bobsleigh

Pendant leur course d'élan, les bobeurs poussent le bobsleigh, initialement à l'arrêt, sur une portion de piste rectiligne et horizontale. Le bobsleigh sera assimilé à un point matériel. On modélisera la poussée par une force $\vec{F}$, $\vec{f}$ modélisera l'action des forces de frottements, $\vec{P}$ l'action mécanique de la Terre et $\vec{R}$ modélisera la composante verticale de l'action de la piste. Toutes ces forces seront considérées comme constantes.

Donnée : *Intensité de la force de poussée* $F = 250$ *N, des forces de frottements* $f = 25$ *N ; masse du bobsleigh* $m = 300$ *kg.*





1. Donner les caractéristiques du vecteur résultante des forces $\sum \vec{F}$.

2. En déduire la valeur du vecteur accélération dans le référentiel terrestre supposé galiléen.

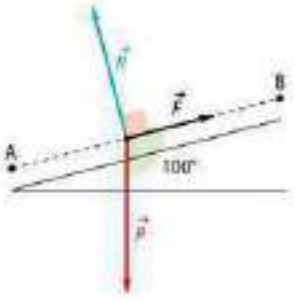
Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

24 Tapis roulant

Pour charger un bagage dans la soute de l'avion, on utilise un tapis roulant. Le système bagage, assimilé à un point matériel, est soumis à trois actions mécaniques modélisées par les forces constantes représentées sur le schéma ci-dessous.

Données : *intensité du poids $P = 300$ N, de la réaction $R = 295$ N, de la traction $F = 52$ N.*





1. Construire, à l'aide d'une échelle judicieusement choisie, le vecteur résultante des forces $\Sigma\vec{F}$.

2. Donner les caractéristiques du vecteur accélération.

3. Le système est-il à l'équilibre ? sinon que peut-on en déduire de son mouvement dans le référentiel terrestre supposé galiléen ?

25 Coup de frein

Un conducteur de scooter se déplace horizontalement à une vitesse de valeur $v = 10$ m·s^{-1}. Il freine pendant une durée $\Delta t = 2,0$ s, avant de s'immobiliser dans le référentiel terrestre supposé galiléen.

La masse du système (conducteur + scooter) est de 200 kg.

1. Calculer la valeur de l'accélération ?

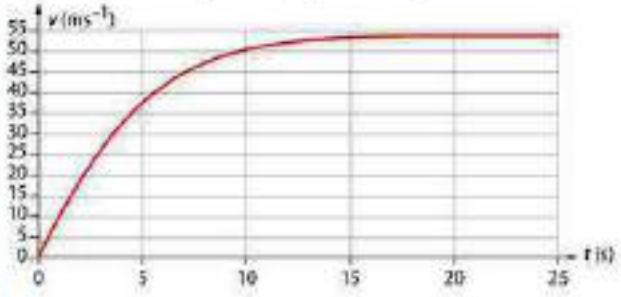
2. Quelle loi de Newton doit-on utiliser pour l'étude de ce mouvement ?

3. En déduire les caractéristiques de la résultante des forces appliquées au centre de masse du système.

26 Saut en parachute (2)

On enregistre, dans le référentiel terrestre supposé galiléen, l'évolution de la vitesse d'un parachutiste avec son équipement. L'ensemble du système a une masse de 90 kg.

Donnée : *intensité de pesanteur $g = 9,8$ N·kg^{-1}*



1. Comment qualifie-t-on le mouvement pendant les 15 premières secondes ?

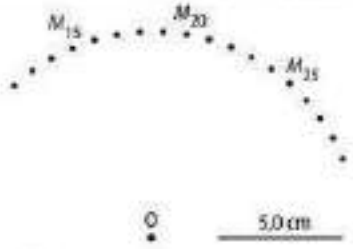
2. Déterminer la valeur de l'accélération au bout de 2,5 s.

3. a. Donner les caractéristiques du vecteur résultante des forces

b. En déduire la valeur de la force qui modélise les frottements de l'air sur le système.

27 Ça tourne

Sur une table horizontale, un mobile autoporteur a été lancé attaché à un fil inextensible dont l'autre extrémité est fixé à un axe de rotation au point O. Les positions du centre de masse du mobile sont enregistrées toutes les 20 ms dans le référentiel terrestre supposé galiléen.



Donnée : $m = 400$ g

1. Déterminer les caractéristiques du vecteur accélération au point M_{20}.

2. Établir le bilan des forces qui modélisent les actions mécaniques s'exerçant sur le mobile autoporteur et les représenter au centre de masse sans soucis d'échelle.

3. En déduire la valeur de la force modélisant la tension du fil.

Faire le point avant d'aller plus loin

PRÉPA BAC

Pour vérifier ses connaissances, répondre aux questions suivantes (sans regarder le cours !)

- Définir le centre de masse d'un système.
- Définir un référentiel galiléen.
- Écrire la deuxième loi de Newton.
- Écrire les conditions d'un système en équilibre.
- Expliciter les étapes qui permettent de déterminer les caractéristiques du vecteur accélération du centre de masse d'un système si les forces modélisant les actions mécaniques exercées sont connues.
- Expliciter les étapes qui permettent de déterminer la résultante des forces modélisant les actions mécaniques exercées sur un système si le vecteur accélération du centre de masse est connu.

Retrouver ces questions en version numérique

Flash PAGE cartes mémos

Exercice résolu EN AUTONOMIE

28 Décollage fusée Ariane 5



Lors d'un lancement la fusée Ariane 5 a une masse totale $M = 7{,}3 \times 10^5$ kg. Sa propulsion est assurée par une force de poussée verticale constante $\vec{F}$. Tout au long du décollage, on admet que la valeur du champ de pesanteur g est également constante.

On étudie le mouvement du système {fusée} dans le référentiel terrestre supposé galiléen et on choisit un repère $(o, \vec{j})$ dans lequel le vecteur $\vec{j}$ est un vecteur unitaire vertical dirigé vers le haut et porté par l'axe Oy.

À l'instant $t_0 = 0$ s, Ariane 5 est immobile et son centre de masse G est confondu avec l'origine O.

On utilise la notation a pour la valeur de l'accélération du centre d'inertie de la fusée, avec $\vec{a} = a_y \vec{j} = a \vec{j}$

Données : *force de poussée $F = 1{,}16 \times 10^7$ N ; intensité de pesanteur $g = 10$ m · s^{-2} ; pendant la durée de fonctionnement, on supposera que seuls le poids $\vec{P}$ et la force de poussée $\vec{F}$ agissent sur la fusée et on admettra que la masse de la fusée reste constante.*

1. **Représenter** ces forces sur un schéma pendant le décollage.
2. **En appliquant** une loi de Newton au système, donner les caractéristiques du vecteur accélération $\vec{a}$ dès que la fusée a quitté le sol par une méthode vectorielle et par une méthode calculatoire.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- Le système et le référentiel galiléen sont définis, la 2e loi de Newton peut donc être appliquée.
- Le mouvement se fait suivant la verticale.
- Il y a deux forces qui modélisent les actions mécaniques s'exerçant sur le système.

LES VERBES D'ACTION

- **Représenter** : représenter la situation par un schéma.
- **Appliquer** : choisir une loi pertinente.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. Poids $P = m \cdot g = 7{,}3 \times 10^5 \times 10 = 7{,}3 \times 10^6$ N

À l'échelle 1,0 cm → $1{,}0 \times 10^6$ N : les vecteurs **$\vec{P}$ mesure 7,3 cm et $\vec{F}$ mesure 11,6 cm.**

2. Deuxième loi de Newton appliquée au système {fusée}, dans un référentiel terrestre considéré galiléen : $\vec{F} + \vec{P} = M \cdot \vec{a}$

Par somme vectorielle, la résultante des forces $\sum \vec{F} = \vec{F} + \vec{P}$ mesure 4,3 cm, sa valeur vaut alors $4{,}3 \times 10^6$ N donc $\vec{a}$ a une direction verticale, sens vers le haut et pour valeur $a = \dfrac{\sum F}{M} = \dfrac{4{,}3 \times 10^6}{7{,}3 \times 10^5} = \mathbf{5{,}9\ m \cdot s^{-2}}$

OU : $F \cdot \vec{j} - P \cdot \vec{j} = M \cdot a \cdot \vec{j}$, en projection sur (Oy) : $F - P = M \cdot a$

$F - M \cdot g = M \cdot a$

Finalement : $a = \dfrac{F}{M} - g = \dfrac{1{,}16 \times 10^7}{7{,}3 \times 10^5} - 10 = \mathbf{5{,}9\ m \cdot s^{-2}}$



QUELQUES CONSEILS

1. Pour représenter ces forces, il faut leur valeur et définir une échelle.
2. Vérifier le sens des vecteurs lors de l'application de la 2e loi de Newton.

EXERCICE SIMILAIRE

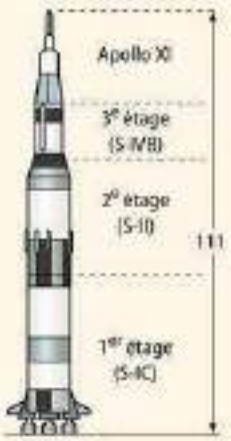
29 Ascension de la fusée Saturn V

Le 16 juillet 1969 à 14 h 32 (heure française), la fusée américaine Saturn V décolle de Cap Kennedy avec à son sommet le vaisseau spatial « Apollo XI » et son équipage.

Le premier étage de la fusée Saturn V fonctionne pendant 180 secondes, il contient environ 2 000 tonnes de carburant et d'oxygène liquide permettant de propulser l'ensemble à une altitude de 68 km. L'intensité de la force de poussée F des réacteurs est de l'ordre de $3{,}3 \times 10^7$ N.

L'étude du lancement de la fusée peut se faire en appliquant la seconde loi de Newton.

1. Quel référentiel supposé galiléen peut-on choisir pour étudier la phase du début du lancement ?
2. Faire un inventaire des forces modélisant les actions mécaniques appliquées à la fusée en tenant compte de l'interaction de l'air avec la fusée. Les représenter au centre de masse de la fusée sur un schéma (le décollage est supposé vertical).
3. En ne considérant que le poids et la poussée, montrer que la valeur de l'accélération de la fusée à l'instant initial du lancement vaut 1,6 m · s^{-2}.



Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Exercice résolu EN AUTONOMIE

30 Propulsion d'un palet

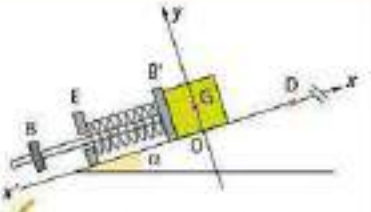
Un palet en acier de masse $m = 50$ g est propulsé sans frottement sur un plan incliné d'un angle $\alpha = 28$ ° avec l'horizontale (L'intensité de pesanteur $g = 9{,}8$ N · kg^{-1}).

Un manipulateur tire sur la tige et comprime ainsi un ressort jusqu'à ce que le centre de masse du palet se trouve au point D. En lâchant la tige, il libère le dispositif qui propulse le palet, jusqu'à ce que le centre de masse du palet arrive en D où il est libéré. La position du centre de masse G du palet est repérée sur un axe $x'x$ de même direction que la ligne de plus grande pente de la gouttière et orienté vers le haut.

La chronophotographie suivante présente la position qu'occupe le centre de masse G du palet à intervalles de temps réguliers $\tau = 20{,}0$ ms (points G_0 à G_5, la distance $G_0G_5 = OD = 12{,}1$ cm.). À $t = 0$, le centre d'inertie du palet est au point O ou G_0.



1. **Exprimer** le vecteur accélération $\vec{a}_{G_3}$ du palet au passage du point G_3 en fonction des vitesses $\vec{v}_{G_4}$ et $\vec{v}_{G_2}$ et de l'intervalle de temps τ. **En déduire** la valeur de cette accélération a_{G_3}.
2. En projetant la seconde loi de Newton appliquée au palet sur l'axe $x'x$, exprimer la valeur de la force de rappel F du ressort en fonction de m, g, a_G, α.
3. À l'aide de la question 1 et des données, **calculer** la valeur de F au point G_3.



LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- On donne le schéma de la situation et les données.
- La chronophotographie et ses conditions d'obtention permettent de calculer a.

LES VERBES D'ACTION

- **Exprimer** : donner l'écriture d'une formule littérale.
- **En déduire** : utiliser le résultat précédent.
- **Calculer** : effectuer une procédure courante.

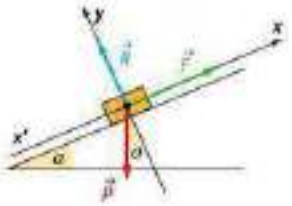
EXEMPLE DE RÉDACTION

1. $\vec{a}_{G_3} = \dfrac{\Delta\vec{v}_G}{\Delta t} = \dfrac{\vec{v}_{G_4} - \vec{v}_{G_2}}{2 \cdot \tau}$ or $v_{G_3} = \dfrac{G_1G_3}{2 \cdot \tau} = \dfrac{4{,}7 \times 10^{-2}}{2 \times 20{,}0 \times 10^{-3}}$

$= 1{,}2$ m · s^{-1} et $v_{G_4} = \dfrac{G_3G_5}{2 \cdot \tau} = \dfrac{6{,}3 \times 10^{-2}}{2 \times 20{,}0 \times 10^{-3}} = 1{,}6$ m · s^{-1}

Les deux vecteurs $\vec{v}_{G_2}$ et $\vec{v}_{G_4}$ ont la même direction et même sens,

donc $a_{G_3} = \dfrac{v_{G_4} - v_{G_2}}{2 \cdot \tau} = \dfrac{1{,}6 - 1{,}2}{2 \times 20{,}0 \times 10^{-3}} = \mathbf{10\ m \cdot s^{-2}}$



2. Dans le référentiel gouttière, référentiel terrestre supposé galiléen, les forces qui modélisent les actions exercées sur le palet sont : le poids $\vec{P}$, la réaction de la gouttière $\vec{R}$ et la force exercée par le lanceur $\vec{F}$.

Appliquons la deuxième loi de Newton au système (palet) : $\vec{P} + \vec{R} + \vec{F} = m \cdot \vec{a}_{G_3}$

Soit en projetant sur l'axe xx' : $\mathbf{-m \cdot g \cdot \sin\alpha + 0 + F = m \cdot a_{G_x}}$

3. Les coordonnées $\vec{a}_{G_3}$ $(a_{G_{3_x}} ; a_{G_{3_y}})$.

Le mouvement étant rectiligne sur l'axe $x'x$ alors $a_{G_y} = 0$ donc $a_{G_x} = a_{G_3}$

On obtient donc $\mathbf{F = m \cdot (a_{G_3} + g \cdot \sin\alpha)}$

AN : $F = 50 \times 10^{-3} \times (10 + 9{,}8 \times \sin(28)) = \mathbf{0{,}73\ N}$

QUELQUES CONSEILS

1. Attention à l'échelle de la chronophotographie.
2. Reporter l'angle de la pente au niveau du poids.
3. Attention aux unités et au paramétrage de la calculatrice pour les angles en degré (°).

EXERCICE SIMILAIRE

31 Démarrage en côte

Un automobiliste, à l'arrêt dans sa voiture, doit réaliser un démarrage dans une côte faisant un angle de 10° avec l'horizontale. En 10 s, il atteint la vitesse de 72 km · h^{-1}.

On étudie le système {automobiliste+voiture} dans le référentiel terrestre supposé galiléen, on néglige les frottements et on note F la force modélisant l'action de propulsion.

Données *: masse du système $M = 1{,}0$ t ; intensité de la pesanteur $g = 9{,}8$ N · kg^{-1}*

1. Donner les caractéristiques du vecteur accélération du centre de masse du système.
2. En projetant la seconde loi de Newton appliquée au système, exprimer la valeur de la force de propulsion F en fonction de m, g, a_G, α.
3. À partir du résultat de la question 1 et des données, calculer la valeur de F au démarrage.
4. En réalité la valeur est plus élevée, justifier.

S'entraîner pour maîtriser

SAVOIR RÉDIGER

32 Pendule simple

Énoncé

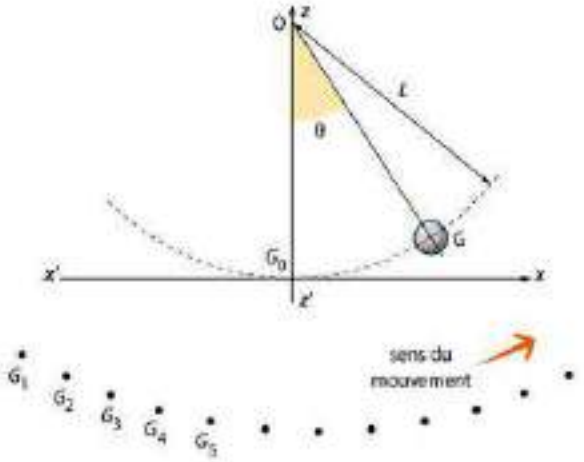
Le pendule est constitué d'une sphère de masse m, suspendu à l'extrémité d'un fil inextensible et de masse négligeable devant celle de la sphère. L'autre extrémité du fil est accrochée en un point fixe O.

On pourra assimiler ce pendule à un pendule simple de longueur L.

Le plan vertical du mouvement du pendule est rapporté à un axe horizontal xx' et à un axe vertical zz', d'origine G_0, orientés comme l'indique la figure.

La tension du fil est dans la direction du fil, vers le point O et a pour valeur $3{,}8 \cdot 10^3$ N.

À l'aide d'un logiciel, on enregistre les différentes positions du centre de masse G de la sphère. On obtient la succession de points représentée ci-contre.



Données : $G_1G_2 = 3{,}2$ cm ; $m = 236$ g ; $g = 9{,}8$ m · s^{-2}
L'intervalle de temps entre deux points consécutifs $\tau = 30$ ms.

1. Justifier la position du centre de masse.
2. Déterminer les caractéristiques de $\vec{a}_4$ vecteur accélération au point G_4 ?
3. En déduire la valeur de la tension du fil.

Solution proposée par un élève

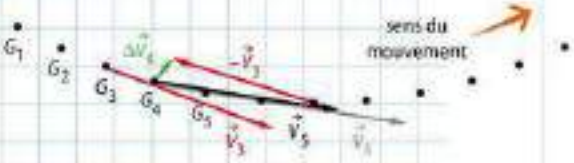
1. Le centre de masse correspond à G car c'est le point qui passe par l'origine du repère quand le pendule est à sa position d'équilibre.

2. Pour déterminer les caractéristiques de $\vec{a}_4$ il nous faut tracer $\vec{v}_3$ et $\vec{v}_5$.

Pour cela $v_3 = \dfrac{G_2G_4}{\tau} = \dfrac{3{,}2 \times 10^{-2}}{30 \times 10^{-3}} = 1{,}1\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $v_5 = \dfrac{G_4G_6}{\tau} = \dfrac{3{,}6 \times 10^{-2}}{30 \times 10^{-3}} = 1{,}2\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Les vecteurs Vitesse étant tangent à la trajectoire, on peut tracer à l'échelle :

On mesure $\Delta v_4 = 0{,}23$ m · s^{-1}. Donc $a_4 = \dfrac{\Delta v_4}{\tau} = \dfrac{0{,}23}{30 \times 10^{-3}} = 7{,}7\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$



La direction et le sens de $\vec{a}_4$ sont ceux de $\Delta\vec{v}_4$

3. D'après la 2e loi de Newton : $\sum \vec{F} = m\vec{a}_G$

D'où $\vec{P} + \vec{T} = m\vec{a}_G$ donc $\vec{T} = m\vec{a}_G - \vec{P}$. Or $m \cdot a_G = 236 \times 7{,}7 = 1{,}8 \times 10^3$ N

Et $P = m \cdot g = 236 \times 9{,}8 = 2{,}3 \times 10^3$ N, $\vec{P}$ étant vertical vers le bas.

La tension du fil, dans la direction du fil, a pour valeur $3{,}8 \cdot 10^3$ N.

33 Voiture de sport

Une voiture de sport passe de 0 à 120 km · h^{-1} en 7,0 secondes sur une route horizontale.

1. Définir le système et le référentiel d'étude.
2. Donner les caractéristiques du vecteur accélération de son centre de masse.
3. La masse de la voiture est égale à 1 000 kg, les forces de frottement f sont égales à 1 500 N.

Calculer la valeur de la force motrice F nécessaire à cette accélération.

34 Elevator

An elevator of total mass $m = 400$ kg, initially immobile, is pulled by a vertical cable stretched by a force of 5,000 N and rises since the ground floor.

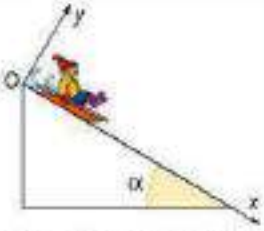
1. What is the study of reference?
2. What is the movement in this frame of reference?
3. Give the characteristics of the vector acceleration.

DONNÉE

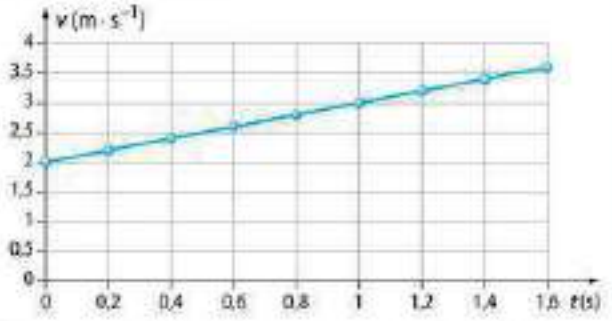
- $g = 9{,}8\ m \cdot s^{-2}$.

35 La luge

Le système {enfant + luge}, de masse m, dévale une piste faisant un angle α avec l'horizontale. On néglige les frottements de l'air et de la piste.



Le mouvement du centre d'inertie du système est enregistré et on obtient, à l'aide d'un logiciel, la représentation graphique $v = f(t)$ suivante.



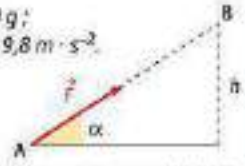
1. Dans quel référentiel ce mouvement est-il étudié ?
2. Quelle est la vitesse initiale du système ?
3. a. À l'aide de la courbe $v = f(t)$, déterminer la valeur de l'accélération du centre d'inertie du système.
   b. Quels sont le sens et la direction du vecteur $\vec{a}$?
4. a. Quelles sont les actions mécaniques qui s'exercent sur le système ?
   b. Représenter les forces modélisant ces actions.
5. a. Établir la relation vectorielle liant ces forces et l'accélération.
   b. Écrire cette relation dans le repère $(O ; x, y)$.
   c. En déduire la valeur de l'angle α.

36 Hockey sur gazon

On étudie le mouvement de la balle de centre de masse G et de masse m, dans le référentiel terrestre supposé galiléen.

Durant la phase de frappe, on néglige toutes les actions liées à l'air ainsi que le poids de la balle. Au point A, la balle est immobile. Entre les points A et B, elle reste en contact avec la crosse. La force $\vec{F}$ qui modélise l'action exercée par la crosse sur la balle est supposée constante. Le segment AB représentant la trajectoire de la balle est incliné d'un angle $\alpha = 30°$ avec l'horizontale.

Données : *- masse de la balle : $m = 160$ g ;*
- intensité du champ de pesanteur : $g = 9{,}8\ m \cdot s^{-2}$.



1. Énoncer la deuxième loi de Newton et l'appliquer à la balle lors de son trajet entre A et B.
2. La force $\vec{F}$ qui modélise l'action de la crosse sur la balle s'exerce pendant une durée $\Delta t = 0{,}11$ s. La balle part du point A sans vitesse initiale et arrive en B avec une vitesse $\vec{v}_B$ telle que $v_B = 14\ m \cdot s^{-1}$.
   a. Donner l'expression du vecteur accélération en fonction du vecteur vitesse.
   b. Calculer la valeur de l'accélération du centre d'inertie de la balle entre les points A et B.
   c. En utilisant les résultats obtenus, calculer l'intensité de la force exercée sur la balle par la crosse.
   d. L'hypothèse sur le poids de la balle est-elle justifiée ?

37 Décollage

DÉMARCHE DIFFÉRENCIÉE

Lors du décollage, un airbus A 320 d'une masse de 75 tonnes atteint une vitesse de $300\ km \cdot h^{-1}$ grâce à ses deux réacteurs lorsque ses roues quittent le sol. La phase de roulage s'effectue en 21 s et sur 875 m de piste.

La poussée totale des deux réacteurs est supposée constante et égale à $F = 320$ kN.

DÉMARCHE EXPERTE

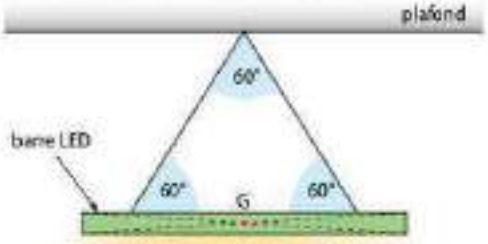
Calculer la valeur des forces résistantes f s'opposant au mouvement (on suppose que la portance compense le poids).

DÉMARCHE AVANCÉE

1. Représenter au centre de masse de l'avion, les quatre vecteurs représentant les forces qui modélisent les actions mécaniques s'exerçant sur l'avion : $\vec{P}$ pour le poids, $\vec{F}$ pour la poussée des réacteurs, $\vec{\pi}$ pour la portance et $\vec{f}$ pour la trainée.
2. Calculer l'accélération moyenne a_m lors de la phase de décollage.
3. En appliquant la 2e loi de Newton, montrer que la valeur des forces résistantes f s'opposant au mouvement est environ égale à 20 kN (on suppose que la portance compense le poids).

38 Luminaire

Une barre LED de masse 500 g est accrochée à un plafond par deux câbles métalliques identiques exerçant une action de tension d'intensité similaire sur la barre.



1. Justifier la position du centre de masse G de la barre LED.
2. La barre LED est-elle à l'équilibre ?
3. Déterminer la valeur de la tension de chaque câble.

Coups de pouce

- La barre de LED est un parallélépipède rectangle.
- Représenter toutes les forces modélisant les actions mécaniques exercées sur la barre en G en faisant apparaître les angles.

39 Texte d'Isaac Newton

HISTOIRE DES SCIENCES

Extrait du *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* publié dans le tome I en 1687 par I. Newton et traduit par la comtesse du Chatelet en 1759.

> *Les changemens qui arrivent dans le mouvement sont proportionnels à la force motrice, & se font dans la ligne droite dans laquelle cette force a été imprimée.*
> *Si une force produit un mouvement quelconque, une force double de cette première produira un mouvement double, & une force triple un mouvement triple, soit qu'elle ait été imprimée en un seul coup, soit qu'elle l'ait été peu à peu & successivement, & ce mouvement, étant toujours déterminé du même côté que la force génératrice, sera ajouté au mouvement que le corps est supposé avoir déjà, s'il conspire avec lui, ou en sera retranché, s'il lui est contraire, ou bien sera retranché ou ajouté en partie, s'il lui est oblique, & de ces deux mouvements il s'en formera un seul, dont la détermination sera composée des deux premières.*
>
> *La grandeur [...] selon la ligne [...].*

1. Par quelle grandeur peut-on remplacer expression « changements qui arrivent dans le mouvement » ?
2. Que représente pour Newton la « force motrice » ?
3. Énoncer cette loi dans un langage actuel.
4. Justifier alors la phrase « si une force produit un mouvement quelconque, une force double de cette première produira un mouvement double, et une force triple un mouvement triple ».

40 Remonte pente

Une skieuse de masse inconnue démarre la remonté d'une pente faisant un angle α avec l'horizontale. Les vecteurs représentant les forces qui modélisent les actions mécaniques qui s'exercent sur elle sont tracés au point G ci-dessous.

Donnée : *intensité de la pesanteur* $g = 9{,}8\ N \cdot kg^{-1}$



1. Définir le système et le référentiel d'étude.
2. Que représente le point G sur le schéma ?
3. Déterminer la valeur de l'accélération de la skieuse.

JE VÉRIFIE QUE J'AI...

- je sais déterminer graphiquement la résultante des forces.
- je sais déterminer le rapport a/g en utilisant les vecteurs $\vec{P}$ et $\sum \vec{F}$

41 Voiture au banc d'essai

TABLEUR-GRAPHEUR

Une voiture de masse $M = 1\,200$ kg se déplace sur une route horizontale rectiligne. Elle est soumise à des actions mécaniques extérieures de deux types :

- les actions motrices, modélisées par un vecteur force $\vec{F}_m$ parallèle à la route et dans le sens du mouvement, d'intensité constante $F_m = 3\,000$ N ;
- les actions résistantes, modélisées, tant que la vitesse est inférieure à $20\ m \cdot s^{-1}$, par un vecteur force $\vec{F}_r$ parallèle à la route de sens opposé au déplacement et d'intensité inconnue mais constante.

Afin de déterminer l'intensité de la force $\vec{F}_r$, on procède à la mesure de la vitesse de la voiture à différentes dates, durant la phase de démarrage. On photographie les positions successives de la voiture toutes les secondes. Le départ des photographies est synchronisé avec celui de la voiture. A $t = 0$ s, l'avant de la voiture coïncide avec la position origine $x = 0$ m (pour plus de clarté, la position de la voiture à cet instant n'a pas été représentée sur l'enregistrement).



1. Définir le système et le référentiel galiléen d'étude.
2. Pourquoi la voiture est-elle repérée par l'avant et non pas par le centre de masse ?
3. Indiquer la méthode pour évaluer la vitesse de la voiture à une date t_i donnée.
4. À l'aide de votre calculatrice ou d'un tableur grapheur :
   a. donner les valeurs de la vitesse aux dates 1s, 2s, ...6s ;
   b. représenter graphiquement cette vitesse en fonction de du temps ;
   c. donner l'équation de la courbe $v = f(t)$;
   d. en déduire la valeur de l'accélération du mouvement ;
   e. en déduire la valeur de la force $\vec{F}_r$.

À L'ORAL

42 Chute libre

Élaborer un exposé oral de quelques minutes permettant d'expliquer qu'en l'absence d'action de l'air sur un système, une plume et une pomme lâchés de la même position touche le sol en même temps comme le montre l'animation suivante.



Les mots-clés à utiliser

- systèmes
- référentiel galiléen
- 2e loi de Newton
- centre de masse
- accélération
- intensité de la pesanteur

43 RETOUR SUR LA PAGE D'OUVERTURE

Au décollage un avion est soumis à des actions mécaniques.



Préparer un exposé oral qui explique :
- comment évaluer la valeur des forces qui modélisent ces actions mécaniques qui s'exercent sur le bunger par les élastiques ;
- comment déterminer l'accélération de la nacelle.

PRÉPA BAC

Développer ses compétences

44 Vol d'un drone — RÉSOLUTION DE PROBLÈME

40 min

(AN/RAI) Proposer une stratégie de résolution

Les drones de loisirs à quatre hélices sont des véhicules aériens de faibles dimensions. Ils sont vendus au grand public pour être utilisés en loisir ou en activités professionnelles pour des prises de vue en altitude.



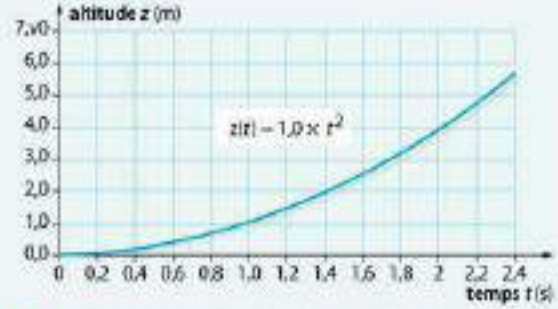
DOC 1 Étude du vol

Un film du décollage vertical a été réalisé afin de déterminer la force de poussée exercée sur le drone.
Le système {drone} est étudié dans le référentiel terrestre considéré comme galiléen. Le schéma ci-dessous représente la position du centre de masse du drone à l'instant initial. Le point O est l'origine du repère.
Le schéma ci-dessous est tracé sans souci d'échelle.



DOC 2 Exploitation de la vidéo

L'exploitation du film a permis d'obtenir l'évolution dans le temps des grandeurs $z(t)$ (Fig. A) et $a_z(t)$ (Fig. B), respectivement coordonnées suivant l'axe vertical du vecteur position et du vecteur accélération du drone, et les deux courbes ci-dessous modélisant l'évolution de ces grandeurs.



A Évolution temporelle de l'altitude du drone par rapport au sol.



B Évolution temporelle de l'accélération du drone lors du décollage.

On suppose que seuls le poids $\vec{P}$ et la force de poussée $\vec{F}$ (verticale vers le haut) modélisent les actions mécaniques qui agissent sur le drone lors de la phase de décollage vertical.

DONNÉES
- Masse du drone : $m = 110$ g
- Intensité de la pesanteur : $g = 9{,}8$ N . kg^{-1}

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. À l'aide de l'équation de la figure A du document 2, vérifier la valeur de l'accélération au décollage de la figure B.
2. Comparer qualitativement les valeurs des forces $\vec{P}$ et $\vec{F}$ lors du décollage
3. Calculer la valeur de la force de poussée lors du décollage.

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

On souhaite fixer une webcam de masse m_w sur ce drone.

Quelle serait, en théorie, la valeur de la masse maximale de cette webcam au-delà de laquelle le décollage ne serait plus possible ?

Il est attendu une prise d'initiatives et une présentation de la démarche suivie même s'il elle n'a pas abouti.

45 Record de saut en longueur à moto

RÉSOLUTION DE PROBLÈME

50 min

ANALYSE Proposer une stratégie de résolution

Le 31 mars 2008, l'Australien Robbie Maddison a battu son propre record de saut en longueur à moto à Melbourne. Son deux-roues, après une phase d'accélération, a abordé le tremplin avec une vitesse de 160 km · h^{-1} et s'est envolé pour un saut d'une portée égale à 107 m.

DONNÉES

- Le système (motard + moto) est assimilé à son centre de masse G et sa masse vaut 180 kg.
- L'étude est faite dans le référentiel terrestre considéré comme galiléen.

DOC 1 Conditions du saut

Le saut se déroule en trois phases de mouvement, à savoir :

- la phase d'accélération du motard (de A à B) ;
- la montée du tremplin (de B à C) ;
- le saut (au-delà de C).



DOC 2 Enregistrement du saut

On considère que le motard s'élance, avec une vitesse initiale nulle, sur une piste rectiligne en maintenant une accélération constante.

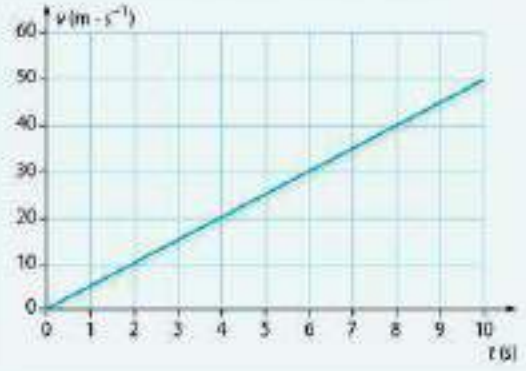
Une chronophotographie (en vue de dessus) représentant les premières positions successives du centre de masse G du système est donnée **ci-dessous.**

La durée $\tau = 0{,}800$ s sépare deux positions successives du centre de masse G.

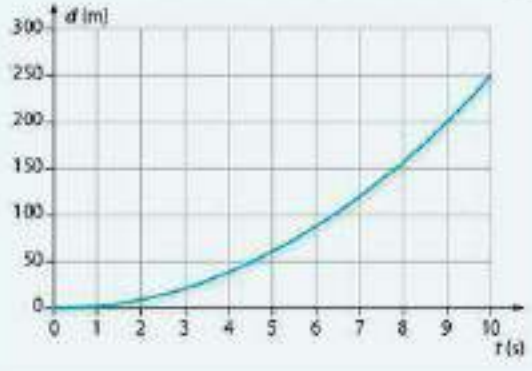
À $t = 0$ s, le centre de masse du système est au point A (G_0 sur la chronophotographie).



DOC 3 Évolution au cours du temps de la valeur *v* de la vitesse du motard



DOC 4 Évolution au cours du temps de la valeur *d* parcouru par le motard depuis la position G_0



QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Déterminer la valeur de l'accélération en G_3.
2. Vérifier que cette valeur sera la même au point B.

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

Déterminer la valeur de la distance AB parcourue et celle de la force motrice nécessaire pour réaliser ce record.

Il est attendu une prise d'initiatives et une présentation de la démarche suivie même s'il elle n'a pas abouti.

46 Lancer de marteau RÉSOLUTION DE PROBLÈME

30 min

ANALYSE Proposer une stratégie de résolution

Le lancer du marteau est une discipline de l'athlétisme qui consiste à lancer le plus loin possible un boulet auquel est fixé un câble en acier muni d'une poignée. On étudie le mouvement du boulet avant le lâcher du marteau par l'athlète.

DOC Principe du lancer de marteau

Pour simplifier l'étude, on suppose que l'athlète tourne sur lui-même autour d'un axe immobile vertical et que son bras est toujours tendu. Dans le référentiel terrestre, le mouvement du boulet est alors supposé plan et circulaire, accéléré dans un premier temps puis uniforme dans un deuxième temps.

Données : la vitesse v est égale à 26 m · s^{-1} ; l'intensité de la pesanteur g à 9,8 m · s^{-2} et vous proposerez une valeur pour le rayon R de la trajectoire.

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. À partir de la définition du vecteur accélération $\vec{a}$, **montrer** qualitativement l'existence d'une accélération lors d'un mouvement circulaire.
2. En justifiant la réponse, tracer les vecteurs vitesse $\vec{v}$ et accélération $\vec{a}$ représentés en un point de la trajectoire du boulet en vue de dessus dans le cas d'un mouvement circulaire accéléré puis sur un autre schéma correspondant à celui d'un mouvement circulaire uniforme.

PROBLÉMATIQUE

En appliquant la seconde loi de Newton, justifier le fait que, dans le cas du mouvement circulaire uniforme, le poids du boulet soit négligeable devant la force qui modélise l'action exercée par le câble sur le boulet.

VERS LE SUP'

47 Détermination de la viscosité d'une huile

On souhaite déterminer expérimentalement la viscosité d'une huile moteur.

Pour cela on filme la chute verticale d'une balle dans cette huile moteur avec une caméra numérique.

L'exploitation du film avec un ordinateur permet de déterminer les valeurs de vitesse de la balle en fonction du temps.

1. Validité de la modélisation de la force de frottement

L'étude du mouvement de la balle se fait dans le référentiel du laboratoire. L'axe vertical Oz est dirigé vers le bas.

Les caractéristiques de la balle sont : masse $m = 35{,}0$ g ; rayon $R = 2{,}00$ cm ; volume $V = 33{,}5$ cm^3.

La masse volumique de l'huile est $\rho_{huile} = 0{,}910$ g · cm^{-3}.

On suppose que la force modélisant le frottement de l'huile s'exprime sous la forme : $\vec{f} = -k \times \vec{v}_G$

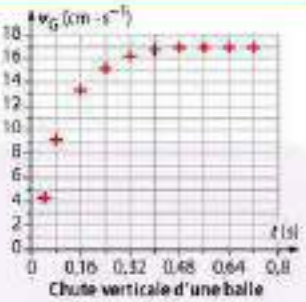
où $\vec{v}_G$ est la vitesse du centre de masse de la balle, k une constante et v_G la composante de la vitesse suivant l'axe Oz.

La poussée d'Archimède modélisant l'action de poussée verticale vers le haut de l'huile sur le système a pour expression vectorielle : $\vec{F}_A = -\rho_{huile} \times V \times \vec{g}$

a. Le référentiel du laboratoire est-il galiléen lors de cette expérience ?

b. Faire l'inventaire des forces extérieures appliquées à la balle en chute verticale dans l'huile, puis les représenter sur un schéma.

c. En appliquant la deuxième loi de Newton, établir l'équation différentielle du mouvement de la balle dans le référentiel du laboratoire.



Chute verticale d'une balle dans une huile moteur

d. Montrer que $\frac{dv_G}{dt}$ peut se mettre sous la forme :

$\frac{dv_G}{dt} = A - B \times v_G$

avec $A = g \times \left(1 - \frac{\rho_{huile} \times V}{m}\right)$ et $B = \frac{k}{m}$.

e. Vérifier que la constante A = 1,27 S · I. En précisant son unité. On donne la valeur du champ de pesanteur $g = 9{,}81$ m · s^{-2}.

f. Résoudre l'équation différentielle et donner l'expression de $v(t)$ en fonction de A, B et t.

g. La solution proposée est-elle en accord avec le graphe ?

2. Détermination de la viscosité de l'huile moteur

Pour des vitesses faibles, la formule de Stokes permet de modéliser la force de frottement fluide $\vec{f}$ agissant sur un corps sphérique en fonction de la viscosité η de l'huile, du rayon de la balle R et de la vitesse de déplacement $\vec{v}_G$ de la balle telle que : $\vec{f} = -6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot R \cdot \vec{v}_G$ avec η en Pa · s, R en m et v_G en m · s^{-1}.

a. En vous aidant de l'expression de B donnée à la question 1. c. et de l'hypothèse $\vec{f} = -k \times \vec{v}_G$, exprimer la viscosité η en fonction de B, m et R.

b. Calculer la viscosité η de l'huile sachant que B = 7,5 s^{-1}.

c. À l'aide des valeurs de viscosité données ci-contre, identifier l'huile de moteur étudiée.

	Huile moteur à 20 °C		
	SAE 10	SAE 30	SAE 50
η (Pa · s)	0,088	0,290	0,700

La 2e loi de Newton

Contexte

L'objectif est de déterminer la force de tension exercée par un élastique avant rupture.

Documents mis à disposition

Mobile autoporteur



Notion d'élasticité

Lorsqu'on exerce une action mécanique (contrainte) sur un matériau, celui-ci arrête de se déformer de manière élastique et réversible à partir d'une certaine valeur de la force modélisant cette action. Le matériau commence alors à se déformer voire à se rompre si il est fragile.

Matériel mis à disposition

- Une calculette type « collège » ou un ordinateur avec fonction « calculatrice »
- Un ordinateur muni d'une webcam, d'un logiciel de pointage et d'un tableur grapheur
- Une table pour mobile autoporteur
- Un élastique avec système d'accrochage sur le mobile

Travail à effectuer

1. (ANA) **Proposition de protocole expérimental** *(20 min conseillées)*

- Proposer un protocole permettant de déterminer la valeur de la force modélisant la tension de l'élastique à sa limite d'élasticité.

Être en mesure de présenter le protocole

2. (RÉA) **Mise en œuvre du protocole expérimental proposé** *(20 min conseillées)*

- Mettre en œuvre le protocole et effectuer l'acquisition de la chronophotographie.

Être en mesure de présenter l'acquisition informatisée

3. (VAL) **Exploitation du résultat obtenu** *(20 min conseillées)*

1. Déterminer le point de rupture.
2. Mesurer les vitesses au point avant et après la rupture.
3. Déterminer l'accélération au point de rupture.
4. En déduire la valeur de la force.

Défaire le montage et ranger la paillasse.

PISTE POUR LE GRAND ORAL PRÉPA BAC

Pour se préparer à l'Oral
➥ Livret LES CLÉS DU BAC (en début de manuel)

UNE QUESTION

Est-il possible de déterminer l'accélération d'un avion pour un décollage avec un impact environnemental minimal ?

Enjeu de la question

L'industrie aéronautique est en pleine expansion mais entraîne des problèmes environnementaux. Il est par exemple nécessaire de pouvoir faire décoller un avion en consommant le minimum de carburant.

Proposition de plan de présentation

1. Définition des actions mécaniques qui s'exercent sur un avion.
2. Poussée des réacteurs et combustion. Consommation de carburant.
3. Force de trainée et de portance.
4. Accélération au décollage.
5. Conclusion : comment abaisser la consommation d'essence pour obtenir la même accélération.

Exemple de support de présentation



Avion en phase de décollage

Les mots-clés

forces (direction, sens, valeur) ▸ 2e loi de Newton ▸ accélération ▸ combustion ▸ 3e loi de Newton

QUESTIONS D'APPROFONDISSEMENT POSSIBLES



UN EXEMPLE DE PROJET PROFESSIONNEL

Les **ingénieurs aéronautiques** sont au centre de la conception d'avions, hélicoptères, ... De la création sur logiciel informatique, au premier vol en passant par la maintenance, ils sont au cœur même de toutes les activités qui y sont liées. Ils travaillent aussi bien dans le domaine de **l'électronique**, de l'**informatique**, de l'**optique** que de la **mécanique de vol** ou de la **résistance des matériaux** car les avions subissent des contraintes physiques énormes pour pouvoir voler.

Après le bac : *bac + 5 : diplôme d'ingénieur ou master du domaine de la mécanique.*
Autres métiers : *ingénieur(e) matériaux, ingénieur(e) en optique, ingénieur(e) en électronique...*



Avant d'aborder le chapitre

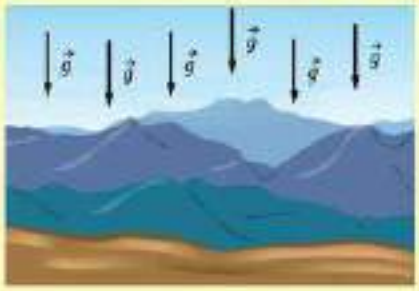
EN AUTONOMIE

LES ACQUIS INDISPENSABLES

1re Enseignement de spécialité

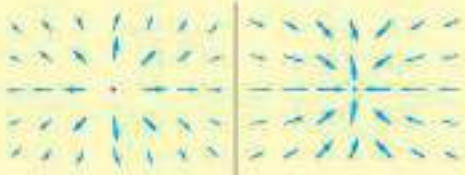
■ Le vecteur champ de pesanteur peut se définir comme le vecteur poids d'un objet divisé par sa masse :

champ de pesanteur → $\vec{g} = \frac{\vec{P}}{m}$



■ L'influence d'une particule chargée se traduit par l'existence d'un champ électrostatique.

champ électrostatique → $\vec{E} = \frac{\vec{F}_{élec}}{q}$



Autour d'une particule chargée positivement

Autour d'une particule chargée négativement

■ L'énergie mécanique d'un système est la somme de son énergie cinétique et de son énergie potentielle.

énergie mécanique (en J) → $E_m = E_c + E_p$ ← énergie cinétique (en J)

énergie potentielle (en J) →

■ En l'absence de forces non-conservatives, il y a conservation d'énergie mécanique. En leur présence, ΔE_m se définit ainsi :

variation d'énergie mécanique (en J) → $\Delta E_m = \Sigma W_{AB(\vec{F}\ \text{non-conservatives})}$

somme des travaux des forces non-conservatives (en J) →

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

Pour chaque situation, rédiger une réponse qui explique en quelques lignes le raisonnement.



SITUATION 1

Vérifier ce message préventif :

1. à l'aide de la conservation de l'énergie mécanique ;

2. en exploitant le théorème de l'énergie cinétique.

Données : *intensité de la pesanteur* $g = 9{,}8\ m \cdot s^{-2}$, *hauteur moyenne d'un étage 3,0 m.*

SITUATION 2

Un noyau d'hélium He^{2+} pénètre dans une région de l'espace caractérisée par un champ de pesanteur $\vec{g}$ et un champ électrique $\vec{E}$.

Données : $g = 9{,}8\ m \cdot s^{-2}$, $E = 100\ V \cdot m^{-1}$, $m_{He} = 6{,}6 \times 10^{-27}\ kg$, $e = 1{,}6 \times 10^{-19}\ C$.

1. Existe-t-il une action mécanique exercée sur le noyau d'hélium qui prédomine ?

2. Même question dans le cas d'un atome d'hélium.



CHAPITRE

12

PHYSIQUE

dans un champ uniforme



Lors d'un vol parabolique d'un avion dans le champ de pesanteur terrestre, comment expliquer l'état de micropesanteur ?

– EXERCICE 22

NOTIONS ET CONTENUS

- Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme. Champ électrique créé par un condensateur plan.
- Mouvement dans un champ de pesanteur uniforme.
- Principe de l'accélérateur de particules chargées. Aspects énergétiques.

CAPACITÉS EXPÉRIMENTALES

- Utiliser un dispositif pour étudier l'évolution des vecteurs position et vitesse, des énergies cinétique, potentielle et mécanique d'un système. – Activité 4

CAPACITÉS MATHÉMATIQUES

- Résoudre une équation différentielle ; déterminer la primitive d'une fonction, utiliser la représentation paramétrique d'une courbe. – Activités 2 et 3

COMPÉTENCES :
APP Extraire l'information utile de supports variés
S'APPROPRIER Faire des prévisions à l'aide d'un outil mathématique

Un accélérateur linéaire

Comment les particules acquièrent-elles de très hautes énergies dans les accélérateurs ?

DOC 1 Un accélérateur de particule au Louvre

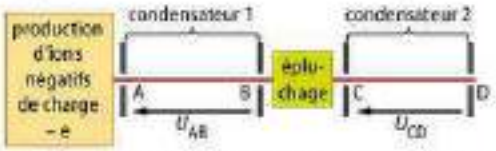


La composition chimique de la matière qui compose des objets d'art ou d'archéologie permet d'identifier un matériau, son origine ou son authenticité, et de prévoir une éventuelle restauration. Le laboratoire des musées de France dispose de plusieurs techniques d'analyse, dont certaines font appel à des équipements de pointe comme le nouvel Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire (New AGLAE) situé dans les sous-sols du musée du Louvre mis en service en 2017.

Cet appareil est un accélérateur linéaire électrostatique de type tandem de 2 MV. Il produit un faisceau d'ions monoatomiques qui est envoyé sur l'objet à étudier. Celui-ci émet des particules en retour : celles-ci sont analysées et les chercheurs en déduisent la nature des éléments chimiques se trouvant à la surface de l'objet. Les avantages de cette technique sont sa rapidité et son caractère non destructif vis-à-vis des œuvres.

DOC 2 Accélérateur de type tandem

Le principe de fonctionnement d'un accélérateur de type tandem est représenté ci-dessous. Ce dispositif contient deux condensateurs plans.



On utilise par exemple, des atomes d'hydrogène H ($Z = 1$), qui sont transformés en ions négatifs de charge $q = -e$ puis qui pénètrent dans le premier condensateur plan. Entre les deux armatures A et B du condensateur règne un champ électrique $\vec{E}$ qui est uniforme et perpendiculaire aux armatures. Ce champ est créé par la tension $U_{AB} = -2{,}0$ MV égale à la différence de potentiel électrique $V_A - V_B$ entre les deux armatures A et B du premier condensateur. Au centre du dispositif, entre B et C, les ions sont ensuite « épluchés » pour devenir des ions positifs de charge $q' = e$, qui sont soumis à une nouvelle tension $U_{CD} = 2{,}0$ MV dans le second condensateur plan.

DOC 3 Énergies d'une particule chargée

Dans un champ électrique uniforme $\vec{E}$, une particule de charge q possède essentiellement une énergie cinétique E_c liée au mouvement et une énergie potentielle électrique $E_{p(élec)}$ liée à sa position.

$$E_{p(\text{électrique})} = q \times V$$

(q : charge électrique (en C) ; V : potentiel électrique (en V))

VOCABULAIRE

- **Condensateur plan :** dispositif formé de deux armatures conductrices, planes et parallèles, séparées par un isolant.
- **Potentiel électrique :** grandeur physique qui caractérise un état électrique (en volt).

EXPLOITATION ET ANALYSE

1 Quel est le type de champ qui agit sur les ions produits par l'accélérateur ? Quel autre champ est négligé ?

2 a. Quel type d'ion est accéléré entre les armatures A et B ? Quelle armature est chargée positivement ?

b. Discuter du signe de la tension U_{AB}.

c. Sur un schéma, représenter le vecteur champ électrique et le vecteur force responsable du mouvement des particules dans le premier condensateur.

3 On considère que l'ion entre en A sans vitesse initiale, le potentiel électrique V_A sera pris égal à 0 V.

Données : $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C,
masse d'un atome d'hydrogène $= 1{,}67 \times 10^{-27}$ kg

a. Déterminer le potentiel électrique V_B puis calculer l'énergie potentielle électrique $E_{p(élec)}$ d'un ion en B.

b. En supposant l'absence de force non conservative, appliquer le principe de conservation de l'énergie mécanique pour exprimer l'énergie cinétique de l'ion en B. Calculer sa vitesse en B.

4 a. Entre B et C, quelle(s) particule(s) élémentaire(s) l'épluchoir enlève-t-il de l'ion incident ?

b. Quelle est de C ou D l'armature chargée positivement ?

c. En supposant que la vitesse des ions ne varie pas entre B et C, déterminer la vitesse v_D.

SYNTHÈSE

5 a. Quel est le rôle des deux condensateurs plans successifs ? Quels transferts énergétiques ont-eu lieu ?

b. Justifier les deux termes d'accélérateur linéaire donnés à cet appareil.

2. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE

TP

COMPÉTENCES :
(RÉA) Utiliser un modèle
(VAL) Confronter un modèle à des résultats expérimentaux

Mouvement d'un projectile

Les équations du mouvement d'une balle peuvent être étudiées à l'aide d'un logiciel afin de mesurer la valeur de l'intensité de la pesanteur.

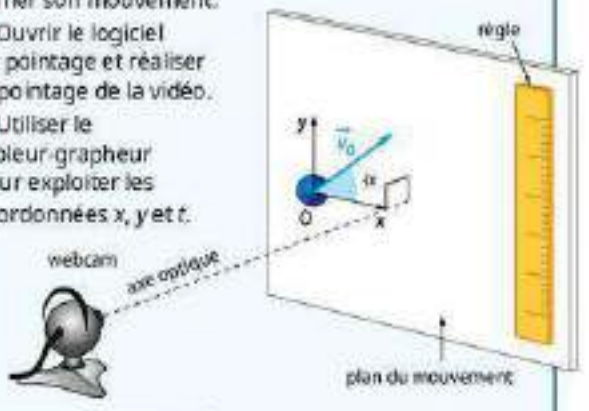
PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Le mouvement d'une balle de golf lancée à la main est filmé avec un dispositif comme une webcam ou bien un smartphone puis étudié à l'aide d'un logiciel de pointage et d'un tableur-grapheur.

- Lancer la balle avec une vitesse initiale V_0 faisant un angle α avec le plan horizontal.

Filmer son mouvement.

- Ouvrir le logiciel de pointage et réaliser le pointage de la vidéo.
- Utiliser le tableur-grapheur pour exploiter les coordonnées x, y et t.



Donnée : $g_0 = 9{,}81\ m \cdot s^{-2}$

DOC 1 Chute libre et accélération

Dans le cas d'une chute libre, la deuxième loi de Newton permet d'établir pour l'accélération du centre de masse G du projectile : $\vec{a(t)} = \vec{g}_0$

DOC 2 Équations horaires du mouvement

Les équations horaires sont les coordonnées des vecteurs position $\overrightarrow{OG(t)}$ et vitesse $\vec{v(t)}$, déterminables grâce aux équations différentielles :

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \text{ et } \vec{v(t)} = \frac{d\overrightarrow{OG}}{dt}.$$

La connaissance des conditions initiales permet de retenir parmi une série de primitives, la seule primitive possible pour chaque coordonnée.

VOCABULAIRE

- **Équation différentielle :** équation dont les inconnues sont des fonctions.
- **Conditions initiales :** valeurs des grandeurs à t = 0 ici coordonnées des différents vecteurs à t = 0.

EXPLOITATION ET ANALYSE

On étudie le mouvement du centre de masse G d'une balle de golf de masse m. Le mouvement est assimilé à celui d'une chute libre.

Réaliser l'acquisition puis le pointage de la vidéo obtenue.

1 Mouvement de la balle

a. Afficher les courbes $x(t)$ et $y(t)$ à l'aide du logiciel. Commenter l'allure des deux courbes obtenues.

b. À l'aide de l'outil dérivée du tableur, calculer les coordonnées du vecteur vitesse $\vec{v(t)}$. Tracer $v_x(t)$ et $v_y(t)$.

Comment qualifier le mouvement horizontal de la balle ? Le mouvement vertical ?

2 1re méthode pour déterminer l'intensité de la pesanteur

a. À l'aide du tableur, calculer les valeurs des coordonnées du vecteur accélération $\vec{a(t)}$. Tracer $a_x(t)$ et $a_y(t)$.

b. En déduire l'intensité de la pesanteur g_{mes} et l'incertitude-type associée $u(g_{mes})$ (FICHE MÉTHODE ➡ p. 538).

c. Comparer g_{mes} à la valeur de g_0 en utilisant le quotient $\frac{|g_{mes} - g_0|}{u(g_{mes})}$.

3 2e méthode pour déterminer l'intensité de la pesanteur

On souhaite mesurer g directement à partir de la position de la balle.

a. En résolvant deux équations différentielles, exprimer $v_x(t)$ et $v_y(t)$.

b. Selon la même procédure, en déduire que les coordonnées du vecteur position $\overrightarrow{OG(t)}$ s'écrivent :

$$\begin{cases} x(t) = v_0 \times \cos\alpha \times t \\ y(t) = -\frac{1}{2} g_0 \times t^2 + v_0 \times \sin\alpha \times t. \end{cases}$$

c. Afficher puis modéliser la courbe expérimentale $y(t)$ par une fonction adaptée. En déduire une deuxième mesure de l'intensité de la pesanteur.

SYNTHÈSE

4

a. Comparer les deux méthodes de détermination de l'intensité de la pesanteur.

b. Quel paramètre expérimental faudrait-il modifier pour diminuer l'incertitude-type ?

Je réussis si...

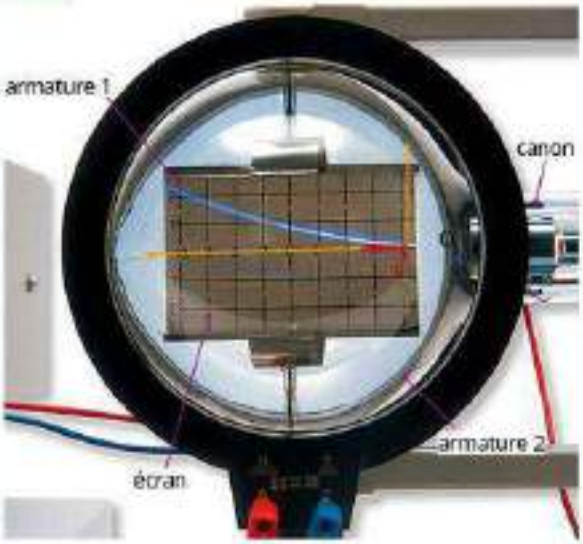
- **Je sais acquérir et pointer une vidéo.**
- **Je sais déterminer puis exploiter les équations horaires du mouvement.**
- **Je sais modéliser une courbe.**
- **MATHS Je sais résoudre une équation différentielle et déterminer la primitive d'une fonction.**

COMPÉTENCES :
(RÉA) Utiliser un modèle
(VAL) Confronter un modèle à des résultats expérimentaux

Électron et charge élémentaire

La déviation d'un faisceau d'électrons par un champ électrique uniforme permet d'accéder au rapport de la charge élémentaire sur la masse de l'électron e/m.

DOC 1 Déviation des électrons au laboratoire par un tube cathodique



Au laboratoire de physique, le tube ci-contre est un tube de verre scellé contenant :

- un canon à électron contenant un filament chauffé qui produit les électrons entrant au point O avec une vitesse initiale :

$$v_0 = 4{,}2 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} ;$$

- deux armatures métalliques A et B planes et conductrices qui dévient la trajectoire des électrons par la force électrique $\vec{F} = q \times \vec{E}$. La tension U entre les deux armatures vaut 3,0 kV ;
- un écran luminescent indiquant la présence d'électrons par une trace bleue ;
- un gaz inerte ou du vide dans la cavité.

Ce type de dispositif est aussi présent dans les anciens téléviseurs et oscilloscopes.

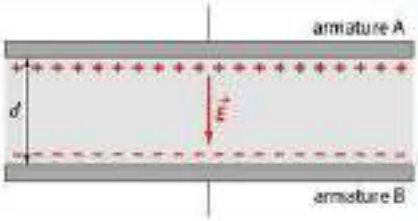
Une division de l'écran représente 1 cm en réalité.

DOC 2 Le condensateur plan

Le condensateur plan est formé de deux lames conductrices A et B parallèles et séparées par un isolant. Entre les lames A et B chargées règne un champ électrique uniforme $\vec{E}$ de valeur donnée par la relation suivante :

$$E = \frac{U_{AB}}{d}$$

- E : charge électrique (en V · m^{-1})
- U_{AB} : tension entre les deux armatures A et B (en V)
- d : distance entre les armatures (en m)



DÉMARCHE EXPERTE

Proposer une stratégie pour déterminer la valeur du rapport de la charge élémentaire sur la masse de l'électron : $\frac{e}{m}$.

DÉMARCHE AVANCÉE

1. Établir les équations horaires du mouvement puis montrer que la trajectoire s'écrit $y(x) = \frac{eE}{2mv_0^2} \times x^2$.

2. a. À l'aide d'un logiciel de traitement d'image et du document 1, pointer, tracer puis modéliser la courbe expérimentale $y = f(x)$ (FICHE MÉTHODE ➥ p. 586).

b. Par identification, en déduire le rapport $\frac{e}{m}$. Conclure en comparant aux valeurs théoriques.

Je réussis si...

- Je sais retrouver l'équation de la trajectoire.
- Je sais tracer puis exploiter la courbe obtenue.
- MATHS Utiliser la représentation paramétrique d'une courbe.

DÉMARCHE ÉLÉMENTAIRE

1. a. Représenter sur un schéma la force électrique qui modélise l'action mécanique subie par un électron.

b. En appliquant la deuxième loi de Newton, exprimer les coordonnées $a_x(t)$ et $a_y(t)$ d'un système électron assimilé à un point matériel.

2. a. Sachant que $\overrightarrow{v(0)} = v_0 \times \vec{i}$, résoudre les équations différentielles $a_x(t) = \frac{dv_x}{dt}$ et $a_y(t) = \frac{dv_y}{dt}$ pour établir que $v_x(t) = v_0$ et $v_y(t) = \frac{eE}{m} \times t$.

b. De même, établir les expressions de $x(t)$ et $y(t)$.

c. En déduire l'équation de la trajectoire par élimination de la variable t : $y(x) = \frac{eE}{2mv_0^2} \times x^2$.

3. a. Télécharger l'image (doc. 1) sur le site Bordas. À l'aide d'un logiciel de traitement d'image et d'un tableur-grapheur, pointer, tracer puis modéliser la courbe expérimentale $y = f(x)$ (FICHE MÉTHODE ➥ p. 564).

b. Par identification, en déduire le rapport $\frac{e}{m}$.

TP

COMPÉTENCES :
(RÉA) Utiliser un modèle
(VAL) Confronter un modèle à des résultats expérimentaux

Chute d'une bille dans un liquide

Comment le pointage d'une chute peut-il renseigner sur une force de frottement ?

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

- Remplir une éprouvette d'huile.
- Déclencher une acquisition vidéo.
- Lâcher la bille de masse m sans vitesse initiale depuis la surface.
- Filmer la chute.
- Ouvrir un logiciel de pointage afin d'obtenir les positions successives de la bille en fonction du temps dans un tableur-grapheur.



DOC 1 Forces de frottement

Les forces de frottement sont des forces non conservatives qui ne sont donc pas associées à une énergie potentielle.

La valeur des forces de frottement augmente avec la vitesse du système.

DONNÉE

- $g_0 = 9{,}8\ m \cdot s^{-2}$

DOC 2 Programme Python

Ce programme affiche l'évolution des différentes grandeurs énergétiques à partir des relevés de position de la bille.

```
Import numpy as np
Import matplotlib.pyplot as plt

#on définit les listes que l'on va créer
V, tg, Ec, Em, Ep=[0],[0],[0],[0],[0]

##On note les différentes valeurs du temps (en millisecondes)
t = np.array([0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180,
320, 340, 360, 380, 400, 420])
t=t/1000 # on convertit les millisecondes en secondes

#On note les différentes valeurs de y en m
Y = np.array([0.327, 0.325, 0.319, 0.31, 0.298, 0.288, 0.21,
0.193, 0.175, 0.156, 0.139, 0.12, 0.102, 0.064, 0.004,
0.049, 0.027, 0.008])
# dans une boucle, on parcourt la liste de t et y pour c
Valeurs de V, Ec, Ep, Em
for i in range(1,21):
Vi=
Eci=
Epi=
Emi=
# On stocke chaque valeur dans les listes
V.append(Vi)
Ec.append(Eci)
Ep.append(Epi)
Em.append(Emi)
tg.append(t[i])
# On trace les trois courbes d'energie
plt.plot(tg,Ec,'or',tg,Ep,'ob',tg,Em,'og')

# On ajoute un titre pour chaque axe et pour le graphique
plt.xlabel(« temps t (en s) »)
plt.ylabel(« Energie (en J) »)
plt.show()
```

EXPLOITATION ET ANALYSE

1 a. Réaliser le protocole expérimental.

b. Compléter le programme Python pour visualiser la position de la bille $y(t)$ au cours du mouvement.

c. Commenter l'allure de la courbe obtenue.

2 a. Faire évoluer le programme Python pour déterminer en différents instants, la vitesse v puis les énergies E_c, E_p et E_m.

b. Visualiser et identifier les courbes d'évolution de $E_c(t)$, $E_p(t)$ et $E_m(t)$.

3 a. Faire le bilan des forces qui modélisent les actions mécaniques qui s'exercent sur la bille pendant son mouvement.

b. Déterminer le travail de la force non-conservative au cours du mouvement.

SYNTHÈSE

4 a. Quels transferts énergétiques se produisent au cours du mouvement ?

b. Quelle est la valeur moyenne de la force de frottement au cours du mouvement ? Est-ce pertinent de calculer une force de frottement moyenne dans cette étude ?

Je réussis si...

- **Je sais acquérir et pointer une vidéo.**
- **Je sais calculer de nouvelles grandeurs à l'aide d'un langage de programmation.**
- **Je sais déterminer puis exploiter les évolutions des différentes formes d'énergie.**

1 Mouvement dans un champ de pesanteur uniforme

Expression du vecteur accélération

On étudie le mouvement d'un objet de masse m au voisinage de la Terre. Dans ce domaine restreint, on peut considérer que le **champ de pesanteur** $\vec{g}_0$ est **uniforme**.

Toutes les actions mécaniques autres que celle modélisée par le poids $\vec{P}$, résultant du champ de pesanteur, seront négligées.

D'après la deuxième loi de Newton, $m \times \vec{a} = \vec{P} = m \times \vec{g}_0$ et $\vec{a} = \vec{g}_0$.

Le vecteur accélération $\vec{a}$ du centre de masse d'un objet placé uniquement dans un champ de pesanteur uniforme est constant et égal au vecteur champ de pesanteur $\vec{g}_0$.

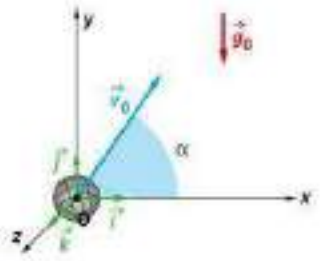


FIG. 1 Le système est lancé depuis O avec une vitesse initiale $\vec{v}_0$ dans le champ de pesanteur uniforme $\vec{g}_0$.

Équations horaires du mouvement

Les équations horaires du mouvement sont les expressions des coordonnées des vecteurs vitesse $\overrightarrow{v(t)}$ et position $\overrightarrow{OG(t)}$ du système. Pour un système, de centre de masse G, lancé depuis le point O dans le plan (xOy) avec une vitesse initiale $\vec{v}_0$ dans le plan (xOy) (FIG. 1), on exprime dans le repère d'espace orthonormé $(O ; \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$, les vecteurs $\vec{g}_0 \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ -g_0 \end{vmatrix}$ et $\vec{v}_0 \begin{vmatrix} v_0 \times \cos\alpha \\ v_0 \times \sin\alpha \\ 0 \end{vmatrix}$.

Puisque $\vec{a} = \dfrac{d\vec{v}}{dt}$, on a $\dfrac{d\vec{v}}{dt} = \begin{cases} \dfrac{dv_x}{dt} = a_x = 0 \\ \dfrac{dv_y}{dt} = a_y = -g_0 \\ \dfrac{dv_z}{dt} = a_z = 0 \end{cases}$.

Par intégration, on en déduit un ensemble de primitives possibles :

$\overrightarrow{v(t)} \begin{cases} v_x(t) = k_1 \\ v_y(t) = -g_0 \times t + k_2 \\ v_z(t) = k_3 \end{cases}$ où k_1, k_2 et k_3 sont des constantes.

La connaissance de la vitesse initiale (à $t = 0$ s) permet d'établir les valeurs de chacune des trois constantes par identification de deux termes égaux :

$$\overrightarrow{v(0)} = \vec{v}_0 \text{ d'où } \begin{cases} v_x(0) = k_1 = v_0 \times \cos\alpha \\ v_y(0) = -g_0 \times 0 + k_2 = v_0 \times \sin\alpha \\ v_z(0) = k_3 = 0 \end{cases}$$

$$\overrightarrow{v(t)} \begin{cases} v_x(t) = v_0 \times \cos\alpha \\ v_y(t) = -g_0 \times t + v_0 \times \sin\alpha \\ v_z(t) = 0 \end{cases}$$

La composante horizontale de la vitesse est constante, la composante verticale de la vitesse est une fonction affine décroissante du temps (FIG. 2) car l'axe Oy est de sens opposé à $\vec{g}_0$.

De même, puisque $\vec{v} = \dfrac{d\overrightarrow{OG}}{dt}$ après intégration et en connaissant la position initiale O à $t = 0$ s, les équations horaires de la position s'écrivent :

$$\overrightarrow{OG(t)} \begin{cases} x(t) = v_0 \times \cos\alpha \times t \\ y(t) = -\dfrac{1}{2} g_0 \times t^2 + v_0 \times \sin\alpha \times t \\ z(t) = 0 \end{cases}$$

UN PONT VERS LES MATHS

Souvent liée au calcul d'intégrales, le terme intégration désigne ici la recherche de primitive. Une primitive d'une fonction f du temps définie sur un intervalle est une fonction F, définie et dérivable sur cet intervalle, dont la dérivée est f.

→ Fiche MATHS p. 535

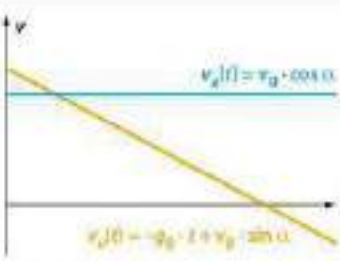


FIG. 2 L'évolution des composantes horizontale $v_x(t)$ et verticale $v_y(t)$ de la vitesse en fonction du temps.

Le mouvement s'effectue dans le plan (xOy) car $z(t) = 0$ (FIG. 3).

Le **mouvement** du centre de masse d'un système **dans un champ uniforme est plan**, le plan étant défini par les vecteurs $\vec{v}_0$ et $\vec{g}_0$.

Équation de la trajectoire

La trajectoire du centre de masse dans le plan (xOy) est donnée par la courbe d'équation $y = f(x)$. Cette équation s'obtient ainsi :

$x(t) = v_0 \times \cos\alpha \times t$ d'où $t = \dfrac{x}{v_0 \times \cos\alpha}$ et en reportant t dans $y(t)$, on obtient :

$$y(x) = \frac{-g_0}{2 \times v_0^2 \times \cos^2\alpha} \times x^2 + x \times \tan\alpha$$

La **trajectoire** du centre de masse d'un système dans un champ de pesanteur uniforme est une portion de **parabole** (FIG. 4).

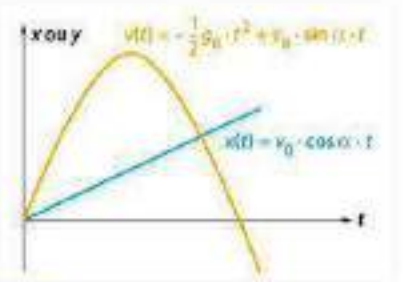


FIG. 3 Les coordonnées $x(t)$ et $y(t)$ au cours du mouvement. $x(t)$ est fonction affine du temps et $y(t)$ est fonction parabolique du temps.

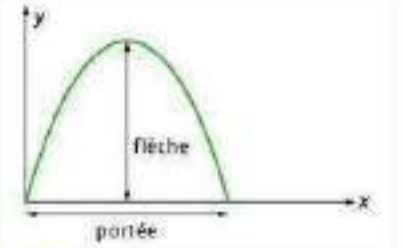


FIG. 4 La flèche est la hauteur maximale atteinte par le système, la portée est la distance entre le point de lancer et le point d'impact sur l'axe horizontal.

2 Mouvements dans un champ électrique uniforme

Le condensateur plan

Un condensateur plan est formé de deux armatures métalliques, lames conductrices planes et parallèles, proches l'une de l'autre et séparées par un isolant comme l'air ou le vide (FIG. 5).

Entre les deux armatures d'un condensateur plan chargé règne un champ électrique uniforme $\vec{E}$ perpendiculaire aux armatures et orienté vers l'armature chargée négativement.

champ électrique ($V \cdot m^{-1}$) — $E = \dfrac{U_{AB}}{d}$ — tension entre les deux armatures A et B (V) ; distance entre les armatures (m)

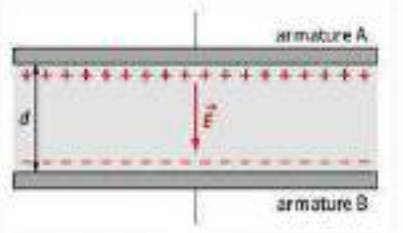


FIG. 5 Condensateur plan.

Particule chargée dans un champ électrique uniforme

À l'intérieur d'un condensateur plan, une particule de charge q n'est soumise qu'à l'action du champ électrique $\vec{E}$ uniforme car le poids $\vec{P}$ de la particule est négligeable devant la force électrique $\vec{F}_e$. D'après la deuxième loi de Newton, on écrit : $m \times \vec{a} = \vec{F}_e = q \times \vec{E}$, d'où $\vec{a} = \dfrac{q}{m} \times \vec{E}$.

Le **vecteur accélération** $\vec{a}$ d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme est dirigé selon le vecteur champ électrique $\vec{E}$.

Le **sens du vecteur** $\vec{a}$ dépend de l'orientation du champ $\vec{E}$ et du signe de la charge q.

EXEMPLE

Le mouvement d'une particule de charge q positive (FIG. 6) a pour équations horaires :

$$\overrightarrow{v(t)}\begin{cases} v_x(t) = v_0 \times \cos\alpha \\ v_y(t) = \dfrac{-qE}{m} \times t + v_0 \times \sin\alpha \end{cases} \text{ et } \overrightarrow{OG(t)}\begin{cases} x(t) = v_0 \times \cos\alpha \times t \\ y(t) = \dfrac{1}{2} \times \dfrac{-qE}{m} \times t^2 + v_0 \times \sin\alpha \times t \end{cases}$$

La trajectoire de la particule est une portion de parabole d'équation $y(x) = \dfrac{-q \times E}{2mv_0^2 \cos^2\alpha} \times x^2 + x \times \tan\alpha$ dont la concavité dépend du signe de q.

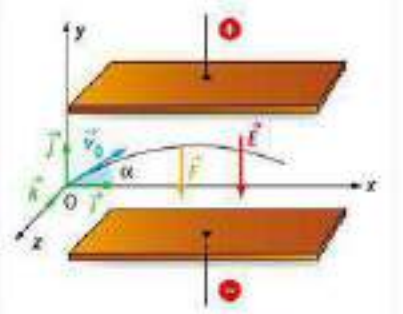


FIG. 6 Charge q positive entrant dans un condensateur plan avec une vitesse initiale $\vec{v}_0$.

3 Aspect énergétique dans un champ uniforme

Principe d'un accélérateur linéaire de particules chargées

Les accélérateurs linéaires de particules sont constitués d'un ou plusieurs condensateurs plans associés en série. Ils sont principalement utilisés en recherche, en imagerie ou à des fins thérapeutiques (FIG. 7).



FIG. 7 Accélérateur linéaire de particule au CERN.

Dans un condensateur plan, le **travail de la force électrique** $\vec{F}_e$ fait varier l'énergie cinétique d'une particule de charge q.

tension électrique entre A et B (V)

variation d'énergie cinétique (J) → $\Delta E_c = W_{AB}(\vec{F}_e) = \vec{F}_e \cdot \overrightarrow{AB} = q \times \vec{E} \cdot \overrightarrow{AB} = q \times U_{AB}$

charge électrique (C)

Dans un condensateur plan, la relation $E = \dfrac{U_{AB}}{AB}$ est toujours vérifiée.

EXEMPLE

Dans un canon à électron (FIG. 8), des électrons sont produits sans vitesse initiale en O puis accélérés dans un condensateur plan. La tension aux bornes du condensateur est égale à $U_{AB} = -5{,}0$ kV. Le travail de la force électrique entre les deux armatures A et B vaut :

$$W_{AB}(\vec{F}_e) = \vec{F}_e \cdot \overrightarrow{AB} = q \times \vec{E} \cdot \overrightarrow{AB} = q \times E \times d \times \cos 0 = q \times U_{AB}$$

soit $\Delta E_c = W_{AB}(\vec{F}_e) = -1{,}6 \times 10^{-19} \times -5\,000 = 8{,}0 \times 10^{-16}$ J.

Le travail est moteur et l'énergie cinétique du système augmente.

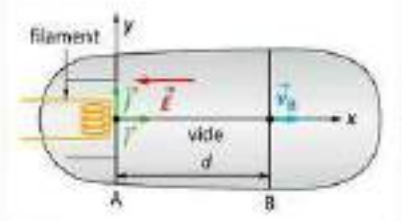


FIG. 8 Canon à électron constitué d'une source d'électron et d'un condensateur plan accélérant les électrons produits.

Conservation de l'énergie

Dans les deux cas de champs uniformes étudiés ici, la force de pesanteur ou la force électrique sont constantes donc **conservatives** et associées respectivement à une **énergie potentielle de pesanteur** E_{pp} ou une **énergie potentielle électrique** $E_{p(élec)}$.

On peut exploiter le principe de conservation de l'énergie selon les deux variantes :

L'**énergie mécanique se conserve** en l'absence de force non conservative : $E_m = E_c + E_p = c^{ste}$ (FIG. 9). Il y a conversion intégrale d'énergie cinétique en énergie potentielle et réciproquement.

La seconde variante utilise l'expression du travail des forces en exploitant le **théorème de l'énergie cinétique** :

$$\Delta E_c = \Sigma W_{AB}(\vec{F}).$$

EXEMPLE

Dans le cas du canon à électron (FIG. 8) pour un parcours entre A et B, d'après la conservation de l'énergie mécanique, $\Delta E_m = 0$ d'où $\Delta E_c = -\Delta E_{p(élec)}$.

Avec $E_{p(élec)} = q \times V$, on obtient $\Delta E_c = E_c(B) - 0 = q \times (V_A - V_B) = -eU_{AB}$

d'où $\dfrac{1}{2} \times m v_B^2 = -eU_{AB}$ et $v_B = \sqrt{\dfrac{-2eU_{AB}}{m}}$

soit $v_B = \sqrt{\dfrac{2 \times (-1{,}6 \times 10^{-19}) \times (-5{,}0 \times 10^3)}{9{,}11 \times 10^{-31}}} = 4{,}2 \times 10^7$ m · s^{-1}.

En appliquant le théorème de l'énergie cinétique, on retrouve également l'expression :

$\Delta E_c = W_{AB}(\vec{F}_e) = \vec{F}_e \cdot \overrightarrow{AB} = q \times \vec{E} \cdot \overrightarrow{AB} = -e \times E \times d \times \cos 0 = -eU_{AB}$

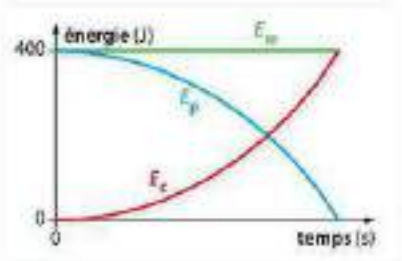


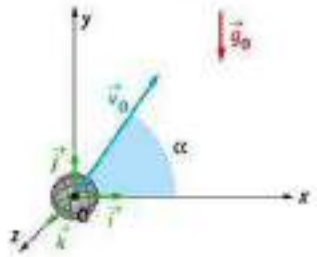
FIG. 9 Conservation de l'énergie mécanique dans un champ uniforme.

FICHE MÉMO PRÉPA BAC

Le vocabulaire à retenir
Les relations à connaître

1 Mouvement dans un champ de pesanteur uniforme

$$\overrightarrow{a_G(t)} = \vec{g}_0 \text{ soit } \overrightarrow{a_G(t)} \begin{cases} a_x(t) = a_z(t) = 0 \\ a_y(t) = -g_0 \end{cases}$$



Équations horaires du mouvement

Pour un objet lancé avec $\vec{v}_0$ oblique

$$\overrightarrow{v(t)} \begin{cases} v_x(t) = v_0 \times \cos\alpha \\ v_y(t) = -g_0 \times t + v_0 \times \sin\alpha \\ v_z(t) = 0 \end{cases}$$

$$\overrightarrow{OG(t)} \begin{cases} x(t) = v_0 \times \cos\alpha \times t \\ y(t) = -\frac{1}{2} \times g_0 \times t^2 + v_0 \times \sin\alpha \times t \\ z(t) = 0 \end{cases}$$

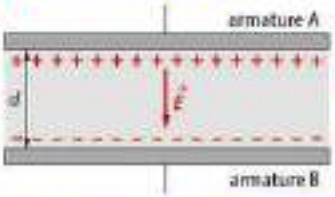
Puisque $z(t) = 0$, le mouvement s'effectue dans le plan (xOy) formé par les vecteurs $\vec{v}_0$ et $\vec{g}_0$.

Équation de la trajectoire parabolique

$$y(x) = \frac{-g_0}{2 \times v_0^2 \times \cos^2\alpha} \times x^2 + x \times \tan\alpha$$

2 Mouvement dans un champ électrique uniforme

Condensateur plan et champ électrique



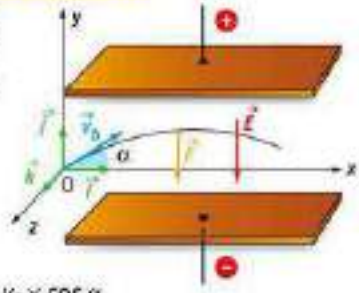
tension entre les deux armatures A et B (en V)

champ électrique (en V · m⁻¹) → $E = \frac{U_{AB}}{d}$ ← distance entre les armatures (en m)

Équations horaires du mouvement

Mouvement de particule de charge $q > 0$ dans le plan formé par les vecteurs $\vec{v}_0$ et $\vec{E}$:

$$\vec{a} = \frac{q}{m} \times \vec{E},$$



$$\overrightarrow{v(t)} \begin{cases} v_x(t) = v_0 \times \cos\alpha \\ v_y(t) = \frac{-qE}{m} \times t + v_0 \times \sin\alpha \end{cases}$$

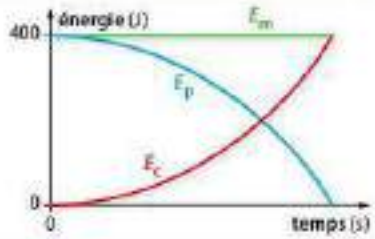
$$\overrightarrow{OG(t)} \begin{cases} x(t) = v_0 \times \cos\alpha \times t \\ y(t) = \frac{1}{2} \times \frac{-qE}{m} \times t^2 + v_0 \times \sin\alpha \times t \end{cases}$$

Équation de la trajectoire parabolique

$$y(x) = \frac{-q \times E}{2\,m v_0^2 \cos^2\alpha} \times x^2 + x \times \tan\alpha$$

3 Aspects énergétiques dans un champ uniforme

Conservation de l'énergie mécanique



énergie cinétique (en J)

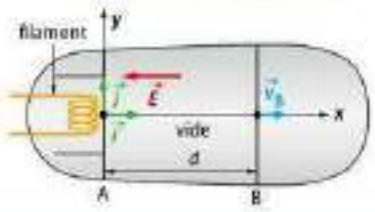
énergie mécanique (en J) → $Em = Ec + Ep$ ← énergie potentielle (en J)

masse (en kg)

$Ep(\text{pesanteur}) = m \times g \times y$ ← altitude (en m)

intensité de la pesanteur (en $m \cdot s^{-2}$)

Principe de l'accélérateur linéaire



$Ep(\text{électrique}) = q \times V$ ← potentiel électrique (en V)

charge électrique (en C)

variation d'énergie cinétique (en J)

tension électrique entre A et B (en V)

$\Delta E_c = W_{AB}(\vec{F}_e) = \vec{F}_e \cdot \overrightarrow{AB} = q \times \vec{E} \cdot \overrightarrow{AB} = q \times U_{AB}$

charge électrique (en C)

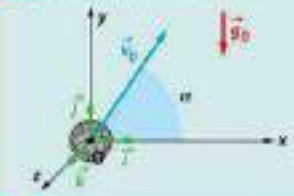
Vérifier l'essentiel EN AUTONOMIE

Pour chaque question, choisir la ou les bonnes réponses. ➡ SOLUTIONS EN PAGE 593

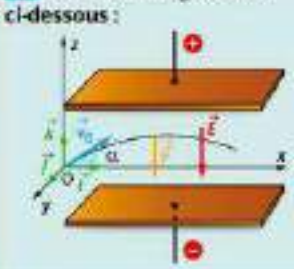
Flash PAGE corrigés détaillés

Flash PAGE QCM interactifs

1 Mouvement dans un champ de pesanteur uniforme

	A	B	C
1 Pour un objet lancé dans un champ de pesanteur uniforme, le mouvement	est uniforme.	est plan.	est uniformément accéléré.
2 Dans cette situation : 	$\vec{g}_0 \begin{cases} 0 \\ g_0 \\ 0 \end{cases}$	$\overrightarrow{v_0(t)} \begin{cases} v_0 \times \sin\alpha \\ v_0 \times \cos\alpha \\ 0 \end{cases}$	en chute libre, $a_y(t) = -g_0$
3 Dans la même situation, en chute libre :	$\overrightarrow{v_G(t)} \begin{cases} v_0 \times \cos\alpha \\ -g_0 \times t + v_0 \times \sin\alpha \\ 0 \end{cases}$	la trajectoire est hyperbolique.	la trajectoire a pour équation : $y(t) = -\frac{1}{2} g_0 t^2 + v_0 \sin\alpha \times t$

2 Mouvement dans un champ électrique uniforme

	A	B	C
4 Dans un condensateur plan avec une tension $U_{AB} > 0$ entre les armatures, le champ $\vec{E}$:	est perpendiculaire aux armatures et orienté vers l'armature A.	est proportionnel à la tension U_{AB}.	est proportionnel à la distance d entre les armatures.
5 Dans la configuration ci-dessous : 	la particule peut être un électron.	la composante $v_x(t)$ de la vitesse est une constante.	la composante $v_y(t)$ de la vitesse est une fonction affine du temps.
6 Pour un proton qui entre dans le précédent condensateur avec une vitesse horizontale $\vec{v}_0$:	sa trajectoire est un arc de parabole.	la force $\vec{F}_e$ est orientée vers l'armature, chargée négativement.	Son accélération vaut $\vec{a} = \frac{m}{e} \times \vec{E}$.

3 Aspects énergétiques dans un champ uniforme

	A	B	C
7 Dans un champ $\vec{E}$ uniforme, en absence de force de frottement :	l'énergie mécanique se conserve.	une énergie potentielle E_p peut être associée à la force électrique.	$\Delta E_c = \Delta E_p$.
8 Dans un accélérateur de particule constitué d'un condensateur plan d'armatures A et B :	d'après le théorème de l'énergie cinétique $\Delta E_c = W_{AB}(\vec{F}_e) = q \times U_{AB}$	le vecteur accélération est parallèle aux armatures.	si la vitesse d'entrée est nulle alors la vitesse de sortie vaut $v_B = \sqrt{\frac{2qU_{AB}}{m}}$

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

corrigés détaillés

Acquérir les bases

1 Mouvement dans un champ de pesanteur uniforme

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Mouvement dans un champ de pesanteur uniforme
- Établir et exploiter les équations horaires du mouvement.
- Montrer que le mouvement dans un champ uniforme est plan.
- Établir l'équation de la trajectoire.

➡ Acquérir les bases : 9 10 ➡ S'entraîner : 25

DONNÉE
- Intensité de la pesanteur $g_0 = 9{,}81\ m \cdot s^{-2}$

9 Cas d'une chute libre verticale



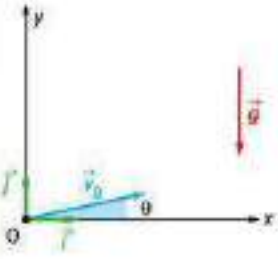
Une bille de masse m est lâchée sans vitesse initiale d'une hauteur $h = 1{,}00$ m. La bille de centre de masse G n'est soumise qu'à l'action mécanique de la Terre modélisée par la force de pesanteur. On choisit pour repère un axe vertical (Oz) orienté vers le bas, dont l'origine O correspond à la position initiale de la bille à $t = 0$.

1. Établir la relation entre le vecteur accélération du centre de masse de la bille et le vecteur champ de pesanteur.
2. En déduire les équations horaires du mouvement $v_z(t)$ et $z(t)$.
3. Montrer que le mouvement de la bille dans le champ de pesanteur est plan.
4. Quelle est la durée de chute ?
5. Quelle est la vitesse maximale atteinte par la bille ?

10 Cas d'un lancer oblique

Lors d'un swing, un joueur de golf professionnel peut envoyer la balle parfois jusqu'à 250 mètres. Cette distance, appelée « portée », est la distance parcourue mesurée horizontalement par rapport à l'impact initial entre le club et la balle de golf.





Une balle de golf de centre de masse G et d'une masse de 46 g est lancée au niveau du sol avec une vitesse initiale v_0 faisant un angle θ par rapport à l'horizontale.

Sa trajectoire est étudiée dans un repère $(O ; x, y, z)$ dont l'origine correspond au point de départ de la balle.

Données : angle $\theta = 11{,}0°$, $v_0 = 75{,}0\ m \cdot s^{-1}$

1. Établir les équations horaires du mouvement.
2. Montrer que le mouvement est plan.
3. Montrer que la portée de la balle s'écrit :
$$x_{max} = \frac{2 v_0^2 \cos(\theta)\sin(\theta)}{g}.$$
4. Calculer puis comparer cette valeur à la valeur annoncée.

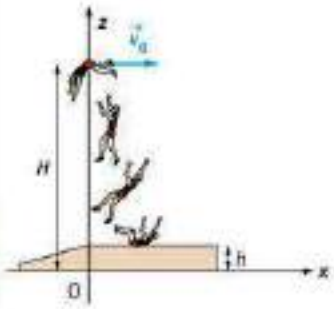
11 Atterrissage d'une perchiste

On souhaite étudier la phase descendante d'une athlète lors de l'épreuve du saut à la perche.

On considère le système perchiste que l'on assimile à un point matériel.

On négligera dans cette phase toute action de l'air. La barre est franchie avec un vecteur vitesse $\vec{v}_0$ horizontal.





On se place dans le repère $(O ; x, y, z)$ en prenant le début de la phase descendante comme origine des temps ($t = 0$ s).

Données : hauteur du tapis de réception $h = 0{,}70$ m ; hauteur du saut $H = 4{,}5$ m

1. Montrer que les composantes du vecteur accélération du système sont :
$$a_x(t) = a_y(t) = 0 \text{ et } a_z(t) = -g_0.$$
2. Montrer que les équations horaires du mouvement du perchiste s'écrivent :
$$x(t) = v_0 \times t,\ y(t) = 0 \text{ et } z(t) = -\frac{1}{2} g_0 t^2 + H.$$
3. Montrer que le mouvement est plan.
4. Quelle est la durée de la phase descendante ?

12 Équation de la trajectoire

Un projectile lancé depuis le sol dans un champ de pesanteur uniforme a pour équations horaires dans un repère orthonormé $(O ; x, y, z)$:

$$x(t) = v_0 \cos\alpha \times t,\ y(t) = -\frac{1}{2} g_0 t^2 + v_0 \sin\alpha \times t \text{ et } z(t) = 0$$

Données : $v_0 = 10{,}0\ m \cdot s^{-1}$; angle $\alpha = 60°$

1. Établir l'équation de sa trajectoire.
2. Représenter la situation sur un schéma et tracer l'allure de sa trajectoire $y = f(x)$.
3. La flèche y_{max} correspond à l'altitude maximale atteinte par le projectile.
Montrer que $y_{max} = \frac{v_0^2 \times \sin^2\alpha}{2 g_0}$. Calculer y_{max}.
4. Exprimer puis calculer la valeur de la portée du tir x_{max} qui correspond à la distance mesurée horizontalement entre le point de lancement et le point d'impact.

2 Mouvement dans un champ électrique uniforme

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Champ électrique crée par un condensateur plan

- Discuter de l'influence des grandeurs physiques sur les caractéristiques du champ électrique créé par un condensateur plan.

Acquérir les bases : 12

Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme

- Établir et exploiter les équations horaires du mouvement.
- Montrer que le mouvement dans un champ uniforme est plan.
- Établir l'équation de la trajectoire.

Acquérir les bases : 14 S'entraîner : 21

13 Condensateur plan

Un condensateur plan est constitué de deux armatures planes et parallèles séparées par un milieu isolant comme l'air.



Entre les deux armatures A et B du condensateur séparées par une distance d, s'établit un champ électrique $\vec{E}$ uniforme tel que $U_{AB} = E \times d$.

Choisir la (ou les) bonne(s) réponse(s).

1. La direction du champ $\vec{E}$ est :
a. parallèle aux armatures ;
b. perpendiculaire aux armatures ;
c. varie selon le signe de la tension U_{AB}.

2. Lorsque la distance entre les armatures est doublée, la valeur du champ électrique $\vec{E}$:
a. est constante ; c. est divisée par deux.
b. est doublée ;

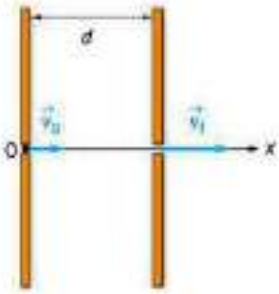
3. Lorsque la tension entre les armatures est divisée par deux, la valeur du champ électrique $\vec{E}$:
a. est constante ; c. est divisée par deux.
b. est doublée ;

4. Lorsqu'on inverse la polarité des armatures :
a. le champ $\vec{E}$ s'annule ;
b. le champ $\vec{E}$ garde la même norme ;
c. Le champ $\vec{E}$ change de sens.

14 Équations horaires du mouvement d'un proton

Un proton pénètre dans un condensateur plan avec un vecteur vitesse initial $\vec{v}_0$ perpendiculaire aux armatures. Dans le condensateur plan règne un champ électrique uniforme de valeur : $E = 2{,}0\ \text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$.

1. Reproduire cette figure et représenter sans souci d'échelle le vecteur $\vec{E}$.



2. a. Montrer que l'action mécanique de la Terre sur le proton est négligeable devant l'action modélisée par la force électrique.
b. Établir la relation entre le vecteur accélération de la particule et le vecteur champ électrique.

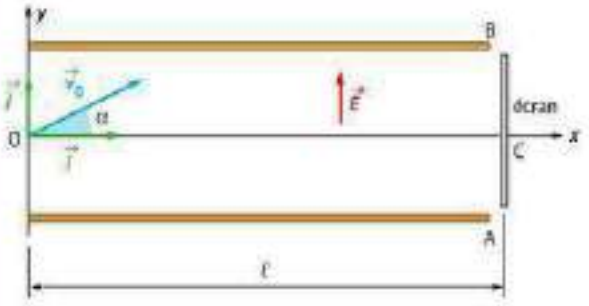
3. a. Projeter cette relation sur l'axe (Ox) et établir une relation entre la composante de l'accélération a_x, E, m et e.
b. En déduire les équations horaires de la vitesse $v_x(t)$ et de la position $x(t)$.
c. Montrer que cet accélérateur est linéaire.

4. a. En exploitant une équation horaire, déterminer à quel instant le proton sort du condensateur.
b. En déduire la vitesse finale du proton. Conclure sur le rôle du condensateur plan dans ce dispositif.

Données : *masse* $m = 1{,}7 \times 10^{-27}$ kg, $v_0 = 2{,}0 \times 10^3\ m \cdot s^{-1}$, *intensité de la pesanteur* $g_0 = 9{,}81\ m \cdot s^{-2}$, $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C, $d = 18{,}0$ cm

15 Équation de la trajectoire d'un électron

Un électron pénètre dans un condensateur plan, comme indiqué sur la figure ci-dessous. On se place dans le repère $(O ; x, y)$.



1. a. Établir l'expression du vecteur accélération de l'électron assimilé à un point matériel.
b. Montrer que les équations horaires de la vitesse s'écrivent :

$$\overrightarrow{v(t)} \begin{cases} v_x(t) = v_0 \times \cos\alpha \\ v_y(t) = \dfrac{-eE}{m} \times t + v_0 \times \sin\alpha \end{cases}$$

c. En déduire les équations $x(t)$ et $y(t)$ donnant la position de l'électron.
d. Montrer que le mouvement de l'électron est plan.

2. a. Établir l'expression de la trajectoire $y = f(x)$ de cet électron.
b. Quelle est la nature de cette trajectoire ?

3. a. Exprimer littéralement la condition que doit vérifier l'angle α pour que l'électron arrive au centre C de l'écran.
b. Calculer α pour $\ell = 20$ cm

Données : *masse* $m = 9{,}1 \times 10^{-31}$ kg, $v_0 = 1{,}0 \times 10^7\ m \cdot s^{-1}$, $E = 850\ V \cdot m^{-1}$; $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C ; $\dfrac{\sin 2\alpha}{2} = \cos\alpha \times \sin\alpha$

3 Aspects énergétiques dans un champ uniforme

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Aspects énergétiques

- Exploiter la conservation de l'énergie mécanique dans le cas du mouvement dans un champ uniforme.
- Exploiter le théorème de l'énergie cinétique dans un champ uniforme.
- Étudier l'évolution des énergies cinétique, potentielle et mécanique.

➥ Acquérir les bases : 17 ➥ S'entraîner : 27

Principe de l'accélérateur linéaire de particules chargées

- Décrire le principe d'un accélérateur linéaire de particules chargées.

➥ Acquérir les bases : 18 ➥ S'entraîner : 32

16 Boule et conservation de l'énergie mécanique



Une boule de pétanque est lancée depuis une hauteur $h = 135$ cm avec une vitesse $v_0 = 6{,}0\ m \cdot s^{-1}$. On assimilera la boule à un point matériel.

Données : *masse $m = 710$ g, intensité de la pesanteur $g_0 = 9{,}81\ m \cdot s^{-2}$*

1. Exprimer son énergie mécanique à l'instant du lancer.

2. a. Sous quelle hypothèse s'applique la conservation de l'énergie mécanique ? Est-ce une hypothèse raisonnable ici ?
b. Exploiter la conservation de l'énergie mécanique pour exprimer puis calculer la vitesse v_f d'impact au sol de la boule.

3. Représenter graphiquement l'allure de l'évolution des différentes énergies au cours du mouvement.

17 Boule et théorème de l'énergie cinétique

Dans les mêmes conditions que l'exercice précédent :

1. Exprimer le travail du poids entre les points de lancer A et d'impact B.

2. Énoncer le théorème de l'énergie cinétique. Exploiter le théorème afin d'exprimer puis de calculer la vitesse v_B d'impact au sol de la boule. Que constatez-vous ?

18 Accélération linéaire de particules et énergie

Les accélérateurs linéaires de particules peuvent être modélisés par une succession de condensateurs plans associés en ligne droite.

Données : *énergie potentielle électrique $E_{pé} = q \times V$, tension $U_{AB} = E \times AB = V_A - V_B = -1{,}0$ kV, $v_0 = 1{,}0 \times 10^3\ m \cdot s^{-1}$, charge élémentaire $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C, masse $m = 9{,}1 \times 10^{-31}$ kg.*

1. Représenter un condensateur plan et indiquer à quelles conditions une particule de charge q peut-elle être accélérée en décrivant une trajectoire rectiligne.

2. Un électron pénètre dans un condensateur plan d'armatures A et B avec un vecteur vitesse perpendiculaire aux armatures. On assimilera la particule à un point matériel et on négligera l'action de la force de pesanteur.
a. Exprimer la loi de conservation de l'énergie mécanique entre le point O et le point de sortie du condensateur plan.
b. En déduire l'expression de la vitesse v_1 en fonction de v_0, e, m et U_{AB}. Calculer v_1.

3. a. Exprimer le travail de la force électrique au cours du mouvement dans le condensateur plan en fonction de e et U_{AB}.
b. Exploiter le théorème de l'énergie cinétique pour retrouver l'expression de la vitesse v_1 établie question 2.

Faire le point avant d'aller plus loin

PRÉPA BAC

Pour vérifier ses connaissances, répondre aux questions suivantes (sans regarder le cours !)

Exprimer le travail $W_{AB}(\vec{F}_e)$ pour une particule de charge q évoluant dans un condensateur plan.

Représenter un condensateur plan. Décrire le champ électrique $\vec{E}$ à l'intérieur et indiquer de quels paramètres dépend $\vec{E}$.

Énoncer puis exprimer le théorème de l'énergie cinétique au cours d'une chute dans un champ de pesanteur uniforme.

Établir l'expression du vecteur $\vec{a}$ d'une particule de charge q dans un champ électrique $\vec{E}$ uniforme.

Décrire le principe de fonctionnement d'un accélérateur de particule.

Établir l'expression du vecteur accélération $\vec{a}$ d'un objet lors d'une chute dans un champ de pesanteur uniforme.

Écrire l'expression de la trajectoire pour un système, de centre de masse G, lancé depuis le point O dans le plan (xOy) avec une vitesse initiale $\vec{v}_0$ formant un angle α avec l'horizontale.

Énoncer puis exprimer la conservation de l'énergie mécanique au cours du mouvement d'une particule dans un champ électrique uniforme.

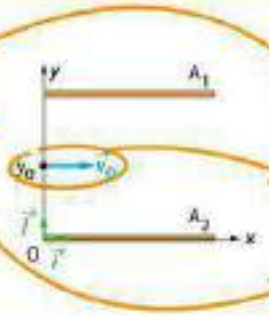
Retrouver ces questions en version numérique Flash PAGE cartes mémos

Exercice résolu EN AUTONOMIE

19 Déviation dans un champ électrique

Un champ électrique uniforme, de valeur $E = 5\,200\ V \cdot m^{-1}$, est créé par un condensateur plan constitué de deux armatures planes A_1 chargée négativement et A_2 chargée positivement séparées de 10 cm et longues de 10 cm. Un électron pénètre dans le champ $\vec{E}$ à l'ordonnée y_0 avec une vitesse $\vec{v}_0$ parallèle aux plaques.

Données : $m = 9,1 \times 10^{-31}\ kg$; $v_0 = 1,0 \times 10^7\ m \cdot s^{-1}$; $\ell = 10\ cm$; $y_0 = 5,0\ cm$.



1. **Exprimer** les composantes du vecteur accélération dans le repère $(O ; x, y, z)$.

2. **a.** En déduire les équations horaires du mouvement de l'électron.
b. Établir l'équation de la trajectoire et montrer que le mouvement est plan.
c. L'électron sortira-t-il du condensateur plan ? Si oui, indiquer les coordonnées du point de sortie S.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ
- La valeur du champ indique que seule la force électrique est à considérer.
- Le schéma renseigne sur les conditions initiales de vitesse et de position.
- Le signe des charges indique l'orientation de $\vec{E}$.

LES VERBES D'ACTION
- **Exprimer :** donner une relation littérale reliant les grandeurs physiques.
- **Établir :** faire apparaître les étapes clés pour aboutir à l'expression.

QUELQUES CONSEILS
1. Représenter $\vec{E}$ sur le schéma. Pour l'électron, $q = -e$.
2. **a.** Pour déterminer les primitives, utiliser les coordonnées du vecteur vitesse à $t = 0$ $(v_0 ; 0 ; 0)$ et de la position G de l'électron à $t = 0$ $(0, y_0, 0)$.
2. **c.** Utiliser l'équation de la trajectoire pour trouver y_S et vérifier que $y_S > 0$.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. On considère le système électron, seule l'action de la force électrique est à prendre en compte, donc d'après la seconde loi de Newton, $m \times \vec{a} = \vec{F}_e = -e \times \vec{E}$, d'où $\vec{a} = \frac{-e}{m} \times \vec{E}$. $\vec{E}$ est perpendiculaire aux armatures et orienté vers y positif.
Les composantes sont :

$$a_x(t) = a_z(t) = 0 \text{ et } a_y(t) = \frac{-e}{m} \times E.$$

2. **a.** Par deux intégrations successives, on obtient :

$$\overrightarrow{v(t)} \begin{cases} v_x(t) = v_0 \\ v_y(t) = \frac{-eE}{m} \times t \text{ car } \overrightarrow{v(0)} = \vec{v}_0 \\ v_z(t) = 0 \end{cases} \text{ puis } \overrightarrow{OG(t)} \begin{cases} x(t) = v_0 \times t \\ y(t) = \frac{-eE}{2m} \times t^2 + y_0 \\ z(t) = 0 \end{cases}$$

car $x(0) = z(0) = 0$ et $y(0) = y_0$.

b. En substituant t par $\frac{x}{v_0}$ dans l'expression de $y(t)$, il vient $y(x) = \frac{-eEx^2}{2mv_0^2} + y_0$.
Puisque $z(t) = 0$, le mouvement se produit dans le plan (xOy).

c. Pour $x_S = \ell$, on trouve $y(x_S) = \frac{-eE\ell^2}{2mv_0^2} + y_0$ soit :

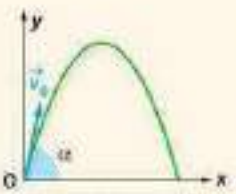
$$y(x_S) = \frac{-1,6 \times 10^{-19} \times 5\,200 \times 0,10^2}{2 \times 9,11 \times 10^{-31} \times (1,0 \times 10^7)^2} + 0,05 = 4,3 \times 10^{-3}\ m.$$

L'électron sortira au point S de coordonnées $(0,10 ; 4,3 \times 10^{-3} ; 0)$.

EXERCICE SIMILAIRE

20 Mouvement d'un ballon

Au rugby, une « chandelle » désigne un coup de pied permettant d'envoyer le ballon en hauteur par-dessus la ligne de défense adverse. L'auteur de cette action frappe le ballon à $t = 0$ s au point O du repère ci-contre. Il doit ensuite se déplacer afin de récupérer le ballon derrière le rideau défensif.



Trajectoire au cours d'une chandelle

Données : *À l'instant $t = 0$ s, le vecteur vitesse du ballon fait un angle α égal à 60° avec l'axe Ox et sa valeur est $v_0 = 10,0\ m \cdot s^{-1}$.*

1. Établir les équations horaires du mouvement du ballon.
2. Montrer que l'équation de la trajectoire du point M est :

$$y(x) = \frac{-g_0}{2 \times v_0^2 \times \cos^2 \alpha} \times x^2 + x \times \tan \alpha.$$

3. Déterminer par le calcul le temps dont dispose le joueur pour récupérer le ballon avant que celui-ci ne touche le sol.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Exercice résolu EN AUTONOMIE

21 Accélérateur de particule

Dans un accélérateur linéaire, un noyau d'hélium He^{2+} ($Z = 2$, $A = 4$) subit le travail moteur et maximal d'une force électrique constante $\vec{F}_e$. De vitesse négligeable à l'entrée, il est accéléré dans l'une des cavités de l'accélérateur modélisée par un condensateur plan de longueur AB sous l'action d'un champ électrique de valeur $E = 400\ kV \cdot m^{-1}$.

Données : *masse d'un nucléon* $m_n = 1{,}7 \times 10^{-27}\ kg$; $g_0 = 9{,}81\ m \cdot s^{-2}$; $e = 1{,}6 \times 10^{-19}\ C$; $AB = 0{,}50\ m$; *énergie potentielle électrique* $E_{p(élec)} = q \times V + cte$

1. a. Montrer que l'on peut négliger l'action mécanique modélisée par la force de pesanteur devant celle associée à la force électrique.

b. Représenter la situation sur un schéma. Identifier le signe des armatures.

2. a. Établir l'expression du travail que fournit la force électrique $\vec{F}_e$ lors du passage du noyau d'hélium dans la cavité en fonction de q et U_{AB}.

b. Énoncer puis appliquer le théorème de l'énergie cinétique pour calculer la vitesse v_B du noyau en sortie de la cavité.

3. a. Montrer que l'énergie potentielle électrique est une fonction affine de la distance x parcourue dans la cavité.

b. Représenter sur un graphe l'évolution des énergies E_c, E_p et E_m en fonction de x.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- Le travail moteur et maximal indique un angle nul entre $\vec{F}_e$ et $\overrightarrow{AB}$.
- La charge de l'ion vaut $q = +2e$. Sa masse vaut $m = 4\,m_n$.

LES VERBES D'ACTION

- **Montrer :** effectuer un raisonnement logique conduisant à un résultat attendu.
- **Établir :** faire apparaître les étapes clés pour aboutir à l'expression.
- **Énoncer :** réciter le théorème dans son intégralité.
- **Représenter :** rendre une situation perceptible par une figure.

QUELQUES CONSEILS

1. Faire un rapport pour comparer les deux valeurs.

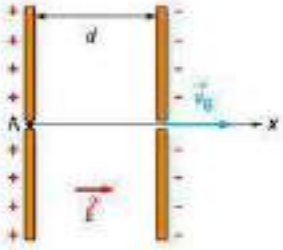
3. Si g est fonction affine de f, elle-même fonction affine de x, alors g est fonction affine de x.

b. Choisir, dans l'expression $E_{pé} = qV + cte$, une constante adaptée pour représenter E_p, E_c et E_m sur le même graphe.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. a. $P = 4\,m_n g$ et $F_e = 2eE$ d'où $\dfrac{F_e}{P} = 5 \times 10^{13}$ donc F_e prédomine.

b. Les noyaux entrés en A dans le condensateur plan sont attirés par l'armature B chargée négativement.



2. a. $W_{AB}(\vec{F}_e) = \vec{F}_e \cdot \overrightarrow{AB} = q \times \vec{E} \cdot \overrightarrow{AB}$

$= 2eE \cdot AB \times \cos 0 = 2eE \cdot AB = 2eU_{AB}$.

b. La variation d'énergie cinétique d'un système se déplaçant du point A au point B est égale à la somme des travaux des forces qui modélisent les actions mécaniques qui s'appliquent sur le système lors de son déplacement :

$\Delta E_c = W_{AB}(\vec{F}_e)$ d'où $\dfrac{1}{2}mv_B^2 = 2eU_{AB}$ et $v_B = \sqrt{\dfrac{4eE \times AB}{4m_n}}$

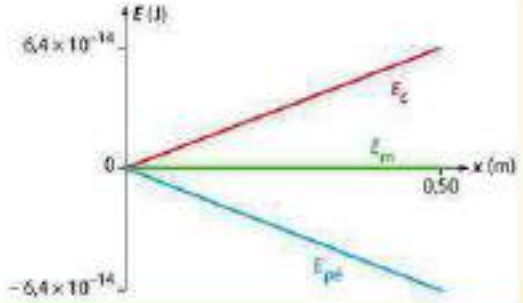
et $v_B = 4{,}3 \times 10^6\ m \cdot s^{-1}$.

3. a. Soit un point X situé à la distance x sur AB, $U_{AX} = E \times x = V_A - V$ donc V est fonction affine de x et puisque $E_{p(élec)} = q \times V + cte$ alors $E_{p(élec)}$ est fonction affine de x.

b. $E_c(A) = 0$ et si on choisit $E_{p(élec)}(A) = 0$ alors $E_m(A) = 0$ à l'abscisse $x = 0$. En l'absence de force non conservative, $E_m(B) = E_m(A) = 0$

or $E_c(B) = \dfrac{1}{2}mv_B^2$ ou $E_c(B) = 6{,}4 \times 10^{-14}\ J$

et $E_{p(élec)}(B) = -E_c(B) = -6{,}4 \times 10^{-14}\ J$ pour $x = 0{,}50\ m$.



EXERCICE SIMILAIRE

22 Lancer de poids

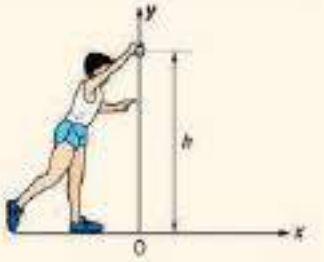
Un lanceur projette un boulet avec une vitesse de $12\ m \cdot s^{-1}$. On assimilera le boulet à un point matériel et on négligera l'action de l'air.

Données : $g_0 = 9{,}8\ m \cdot s^{-2}$, $h = 2{,}05\ m$

1. a. Énoncer le théorème de l'énergie cinétique.

b. L'appliquer au système boulet pour exprimer la vitesse v_B d'impact au sol du boulet.

2. Représenter l'allure des courbes des énergies E_c, E_{pp} et E_m au cours du mouvement.



S'entraîner pour maîtriser

SAVOIR RÉDIGER

23 Proposer une correction de la solution proposée par un élève à l'énoncé.

Énoncé

Une gymnaste s'élance d'un trampoline. On se place dans le repère $(O ; x, y, z)$ avec l'axe Oz vertical orienté vers le haut. Le centre de masse de la gymnaste est à l'altitude $z_0 = 1{,}50$ m lorsqu'elle quitte la surface du trampoline avec une vitesse initiale verticale $v_0 = 7{,}0\ m \cdot s^{-1}$.



On assimile la gymnaste à un point matériel et on néglige toute action de l'air.

1. a. Établir les équations horaires du mouvement du système.
b. Montrer que le mouvement est rectiligne ralenti lors de l'ascension.

2. a. Exprimer la durée de l'ascension t_a du système.
b. Calculer la hauteur h_{max} atteinte par le système.

Solution proposée par un élève

1. a. D'après la deuxième loi de Newton, $\overrightarrow{a(t)} = \vec{g}$ d'où $v_z(t) = -g \times t + v_0$ et $z(t) = \frac{-g}{2} \times t^2 + v_0 \times t$ — Faux car $z(0) \neq 0$.

b. Le poids est orienté vers le bas donc le mouvement est ralenti. — Raisonner avec les équations.

2. a. Au sommet de la trajectoire, la vitesse est nulle.

$v_z(t_a) = -g \times t_a + v_0 = 0$ d'où $t_a = \frac{7{,}0}{9{,}81} = 0{,}71$ s — Exprimer = donner la valeur.

b. $h_{max} = z(t_a) = \frac{-g}{2} \times t_a^2 + v_0 \times t_a$ d'où $h_{max} = \frac{-9{,}81}{2} \times 0{,}71 + 7{,}0 \times 0{,}71 = 1{,}5$ m. — Calcul faux.

24 Paramètres de lancement d'un projectile

ANIMATION Chute libre parabolique



Dans de nombreux sports de lancer comme le javelot, il faut envoyer le projectile le plus loin possible.

Un projectile de masse m est lancé depuis le sol avec une vitesse v_0 formant un angle α avec l'horizontale dans un champ de pesanteur uniforme g_0.

1. a. Quels paramètres du lancement influent sur la portée et la flèche du lancer du projectile ?
b. Établir l'équation de sa trajectoire.

2. a. La flèche y_{max} correspond à l'altitude maximale atteinte par le projectile.

Montrer que $y_{max} = \frac{v_0^2 \times \sin^2 \alpha}{2 g_0}$.

b. Déterminer la valeur de α permettant d'obtenir la flèche maximale. À quelle situation correspond ce tir ?

3. a. La portée du tir correspond à la distance x_{max} parcourue par le projectile selon l'axe horizontal. Sachant que $\sin 2\alpha = 2 \cos \alpha \times \sin \alpha$, montrer que $x_{max} = \frac{v_0^2 \times \sin 2\alpha}{g}$.

b. Quel angle α permet d'obtenir la portée maximale ?

4. Comment varient x_{max} et y_{max} quand la vitesse de lancement est doublée ?

5. Vérifier les résultats des questions 2, 3 et 4 sur l'animation « Chute libre parabolique ».

25 Suivi de l'évolution des énergies

TABLEUR-GRAPHEUR

Un ion Na^+ évolue dans un condensateur plan (où règne un champ électrique uniforme E) selon un mouvement rectiligne. Dans le tableau suivant sont relevées ses positions :

t (en µs)	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
x (en cm)	0,0	0,02	0,9	1,9	3,4	5,3	7,7

t (en µs)	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
x (en cm)	10,1	13,5	17,0	21,0	25,8	30,8	36,3	42,0

Données : *Énergie potentielle électrique*
$E_{p(élec)} = q \times V = e \times E \times x$, *champ électrique* $E = 4{,}0\ kV \cdot m^{-1}$, $m = 3{,}8 \times 10^{-26}$ kg, $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C, v_0 *négligeable*

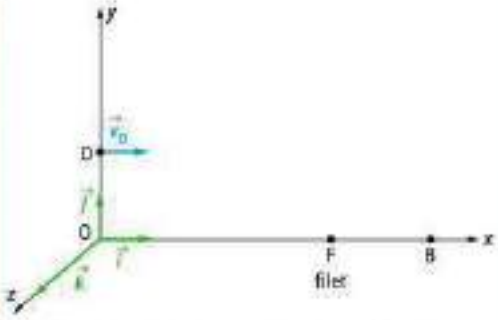
1. Renseigner les valeurs x et t dans un tableur.

2. a. Exprimer la composante de la vitesse $v_x(t)$ puis la calculer à l'aide du tableur.
b. Quelle est la nature du mouvement de la particule ?

3. a. Établir les expressions des différentes énergies cinétique E_c, potentielle électrique $E_{p(elec)}$ et mécanique E_m et les calculer à l'aide du tableur.
b. Représenter graphiquement les énergies au cours du mouvement de la particule. Conclure sur les transferts énergétiques réalisés.

26 Qualité du service au tennis



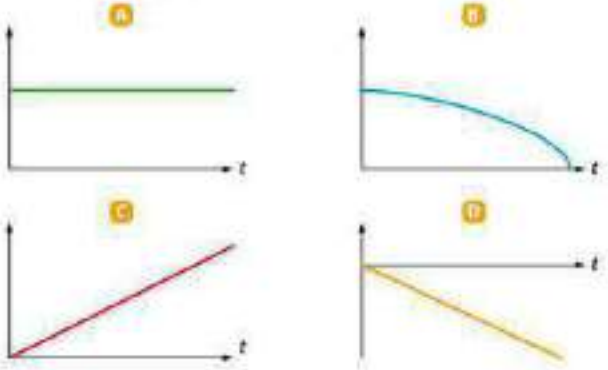


Au service, un joueur de tennis souhaite que la balle frappe le sol en B tel que OB = L = 18,7 m. Pour cela, il lance la balle verticalement et la frappe avec sa raquette en un point D situé sur la verticale de O à la hauteur H. La balle part alors de D avec une vitesse horizontale de valeur v_0 = 126 km · h^{-1}. La balle sera considérée comme ponctuelle et on négligera l'action de l'air.

Données : m = 58,0 g ; OD = H = 2,20 m ; OF = 12,2 m ; g_0 = 9,81 m · s^{-2}

1. Dans le repère (O ; x, y, z), établir l'expression du vecteur accélération de la balle au cours du mouvement.

2. a. Établir les équations horaires $x(t)$, $y(t)$, $v_x(t)$ et $v_y(t)$ de la balle.
b. Attribuer chacune des équations horaires précédentes à l'un des quatre graphes suivants :



3. a. Établir l'équation de la trajectoire de la balle.
b. La balle, supposée ponctuelle, passe-t-elle au-dessus du filet de hauteur 92,0 cm ?
c. Pour être valide, la balle de service doit retomber entre le filet et B. Le service est-il valide ?

4. a. Déterminer le travail du poids de la balle entre l'instant de la frappe et celui de l'impact au sol.
b. En déduire la vitesse de la balle lorsqu'elle frappe le sol.
c. Pourquoi faut-il frapper la balle bien haut lors du service ?

27 Hauteur maximale d'un lancer

Un boulet de masse m, assimilé à un point matériel est lancé verticalement depuis le sol avec une vitesse initiale v_0.

Données :

Grandeur	Valeur	Incertitude-type
m	45 g	0,5 g
v_0	12,0 m · s^{-1}	0,1 m · s^{-1}

Incertitude absolue pour l'énergie cinétique :

$$U(E_c) = E_c \times \sqrt{\left(\frac{U(m)}{m}\right)^2 + 4 \times \left(\frac{U(v)}{v}\right)^2} \; ;$$

Incertitude absolue pour la hauteur maximale du boulet :

$$U(h) = h \times 2\left(\frac{U(v_0)}{v_0}\right) \; ; g_0 = 9{,}81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

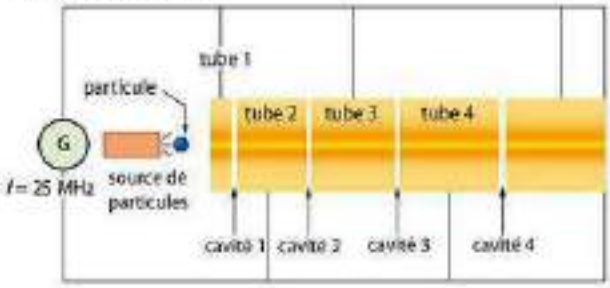
1. Exprimer l'énergie mécanique initiale du système sous la forme E_m +/– $U(E_m)$.

2. a. En négligeant l'action de l'air sur le système, montrer que la hauteur maximale vaudrait $h = \dfrac{v_0^2}{2\,g_0}$.
b. Exprimer la hauteur maximale sous la forme h +/– $U(h)$.

3. La mesure de hauteur maximale atteinte par le boulet après pointage est 6,85 m. L'hypothèse de la question précédente était-elle valide ?

28 Accélérateur linéaire de particule et énergie

Les accélérateurs de particules sont constitués d'une succession de tubes disposés en ligne droite et placés sous vide. Les particules sont accélérées dans les cavités entre les tubes. Les tubes doivent donc changer de polarité d'où la présence d'un générateur alternatif synchronisé au passage des particules.



Données : tension $U_{AB} = V_A - V_B = 1{,}0 \times 10^2$ kV, $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C.
Énergie potentielle électrique $E_{p(elec)} = q \times V + C^{ste}$

1. Par quel dispositif peut-on modéliser une cavité entre deux tubes chargés ?

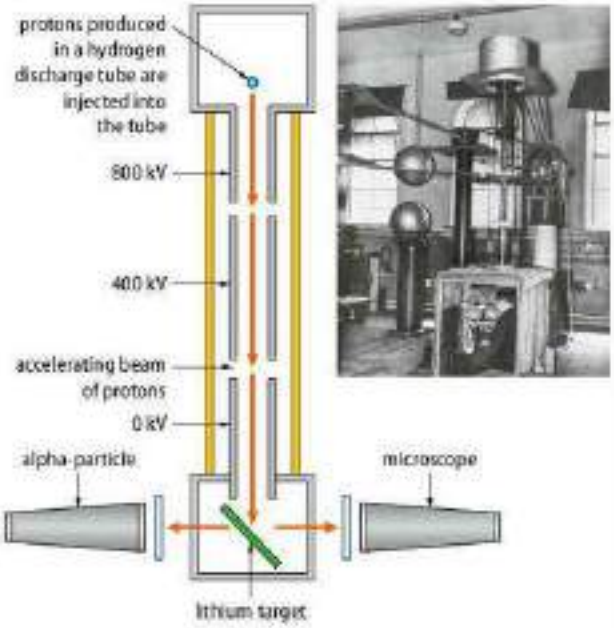
2. a. On considère une particule de charge q traversant une cavité de longueur AB. Sous quelle forme d'énergie s'effectue le gain en énergie de la particule ? Décrire les transferts d'énergie.
b. Déterminer la variation d'énergie d'une particule de charge q dans cette cavité où s'établit une tension U_{AB}.

3. a. À quelle(s) condition(s), le gain en énergie sera-t-il identique pour toutes les cavités ?
b. Dans ces conditions et pour un dispositif de 12 tubes, calculer le gain en énergie pour un proton en eV. Puis en unité SI.

29 The Cockcroft and Walton experiment

HISTOIRE DES SCIENCES

In 1932, John Cockcroft and Ernest Walton (Nobel prizes in Physics 1951) produced the first artificial splitting of a nucleus by bombarding lithium with artificially accelerated protons.



Data : $m = 1,7 \times 10^{-27}$ kg, $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C.

This was also the first transmutation using artificially accelerated particles. Transformers, rectifiers and capacitors were used to produce the necessary high d.c. voltage to accelerate the protons. Protons were accelerated into a vacuum and slammed into lithium atoms producing helium nuclei and energy. This reaction was the first experimental proof of Einstein's $E = mc^2$.

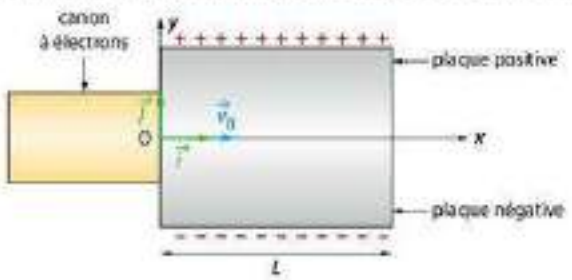
1. a. What type of transformation is experimented here?
b. Why are the protons accelerated in this apparatus? Explain the role of a vacuum.

2. The gain in speed for a proton initially at rest is roughly $1,2 \times 10^7$ m · s^{-1}. Calculate the voltage used to reach this speed.

30 L'expérience de Thomson

HISTOIRE DES SCIENCES

Dès 1897, le physicien anglais John J. Thomson fut le premier à déterminer le rapport e/m (charge électrique sur masse de l'électron) grâce à un tube à vide. Le montage schématisé ci-dessous en reprend le principe : il comporte un tube à vide dans lequel un faisceau d'électrons est dévié lors de sa traversée entre deux plaques de charges opposées. À la sortie des plaques en $x = L$, la déviation verticale du faisceau d'électrons par rapport à l'axe (Ox) est mesurée sur un écran.



Données :

Grandeur	Valeur	Incertitude-type
v_0	$2,27 \times 10^7$ m · s^{-1}	$0,02 \times 10^7$ m · s^{-1}
E	15,0 kV · m^{-1}	0,1 kV · m^{-1}
L	8,50 cm	0,05 cm
h	1,85 cm	0,05 cm

L'incertitude du rapport $\frac{e}{m}$ s'exprime par la formule :

$$u\left(\frac{e}{m}\right) = \frac{e}{m}\sqrt{\left(\frac{u(h)}{h}\right)^2 + \left(\frac{u(E)}{E}\right)^2 + 4\left(\frac{u(v_0)}{v_0}\right)^2 + 4\left(\frac{u(L)}{L}\right)^2}$$

Valeur de référence $\frac{e}{m} = 1,75882 \times 10^{11}$ C · kg^{-1}

1. a. Montrer que le mouvement de l'électron est plan et que la courbe décrite par les électrons admet pour équation : $y = \frac{eE}{2mv_0^2}x^2$

b. En déduire l'expression du rapport $\frac{e}{m}$ en fonction de E, L, h et v_0. Calculer le rapport $\frac{e}{m}$ mesuré.

2. a. Calculer l'incertitude-type $u\left(\frac{e}{m}\right)$ associée à la mesure.

b. Comparer le résultat de la mesure à la valeur de référence. Conclure.

À L'ORAL

31 Accélérateurs de particules



En 2017, le CERN a inauguré un nouvel accélérateur de particules LINAC4. D'autres accélérateurs linéaires sont utilisés en milieu hospitalier (fig).

Élaborer un exposé oral permettant d'expliquer les types de particules présentes dans ces accélérateurs linéaires ainsi que leur rôle en médecine et en recherche.

32 RETOUR SUR LA PAGE D'OUVERTURE

Durant le vol parabolique d'un avion, l'agence spatiale européenne ESA réalise des expériences scientifiques en état de micropesanteur.

Sachant que le mouvement de l'avion s'effectue dans le champ de pesanteur terrestre, préparer un exposé oral qui explique cet état de micropesanteur en vol.



PRÉPA BAC

Développer ses compétences

23 Spectromètre de masse « à temps de vol » ANALYSE ET SYNTHÈSE DES DOCUMENTS

50 min

ANA (R.A) Choisir un modèle ou des lois pertinentes

Le mouvement des particules chargées dans un champ uniforme peut servir à leur identification.

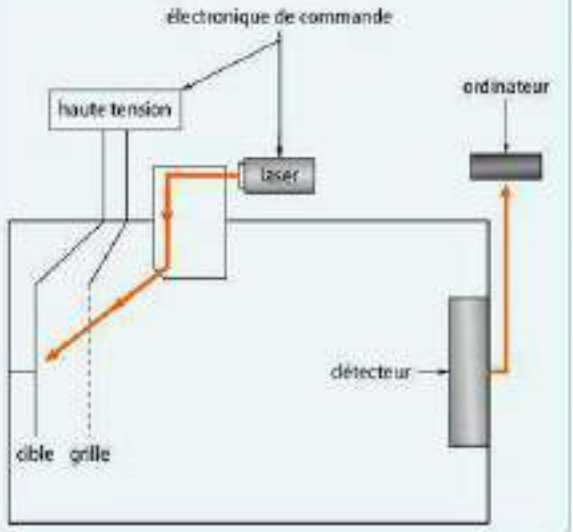
DOC 1 Principe de la spectrométrie de masse

La spectrométrie de masse est une technique d'analyse chimique destructive. Une molécule à analyser est fragmentée en différentes parties dont chacune des masses molaires est déterminée directement ou indirectement. L'accès à la masse puis à la structure des différents fragments permet de reconstituer la molécule à analyser à la manière d'un puzzle et de l'identifier. Cette analyse doit être complétée par d'autres techniques d'analyse.

DOC 2 Spectromètre à temps de vol

Dans un spectromètre de masse à temps de vol, les molécules à analyser sont placées sur une cible. Puis, un faisceau laser pulvérise les molécules en de nombreux fragments ionisés notés F_i^+. Ces fragments sont de masses différentes. Ils sont alors accélérés par un champ électrique. Enfin, en « fin de vol » ils sont détectés.

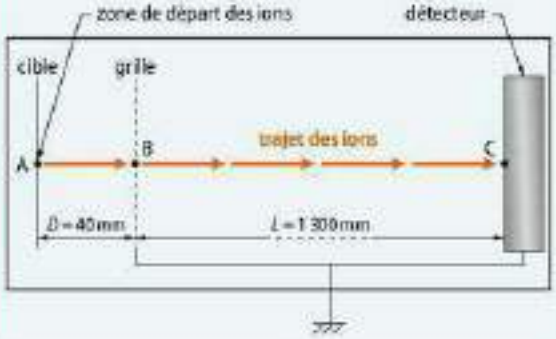
Le schéma d'un spectromètre à temps de vol peut être simplifié comme sur la figure ci-dessous.



DOC 3 Géométrie du spectromètre

Une tension U s'applique entre la cible et la grille métalliques qui sont distantes de D formant un condensateur plan. La valeur E du champ électrique est reliée à U par la relation : $E = \frac{U}{D}$ où D représente la distance entre la cible et la grille.

Après la grille, les fragments ionisés traversent une zone sans champ électrique de longueur L et arrivent jusqu'au détecteur qui repère les entités chargées.



DONNÉES

- Charge élémentaire $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C
- Intensité de la pesanteur $g = 9{,}8$ m · s^{-2}

ANALYSE

1. a. Représenter sur le schéma du document 2, sans souci d'échelle, la force électrique $\vec{F}_e$ qui s'exerce sur un fragment ionisé F_i^+ situé au point A, pour qu'il soit accéléré de la cible jusqu'à la grille située au point B.

b. En déduire la direction et le sens du champ électrique $\vec{E}$ supposé uniforme, qui règne entre la cible et la grille. De quelles grandeurs physiques va dépendre le champ électrique situé entre la cible et la grille ?

2. Montrer que la vitesse v du fragment ionisé F_i^+ au niveau de la grille s'écrit :

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}.$$

Calculer la valeur de la vitesse v pour une valeur de tension appliquée U égale à 20 kV, sachant que la masse du fragment ionisé vaut $m = 7{,}1 \times 10^{-26}$ kg.

3. Montrer que le mouvement du fragment F_i^+ dans la zone entre la grille et le détecteur est rectiligne uniforme.

4. On appelle « temps de vol » la durée du parcours du fragment ionisé entre la cible et le détecteur. Montrer que le « temps de vol » s'écrit :

$$\Delta t = D \times \sqrt{\frac{2m}{eU}} + L \times \sqrt{\frac{m}{2eU}}.$$

Calculer le temps de vol.

SYNTHÈSE

Comment les différents fragments de molécules peuvent-ils être identifiés par un unique détecteur à ions ?

34 Service et réception au volley-ball

RÉSOLUTION DE PROBLÈME

50 min

ANA/RAI Choisir un modèle ou des lois pertinentes

L'étude du mouvement d'un projectile dans un champ de pesanteur uniforme permet d'analyser différentes phases du jeu au volley-ball.

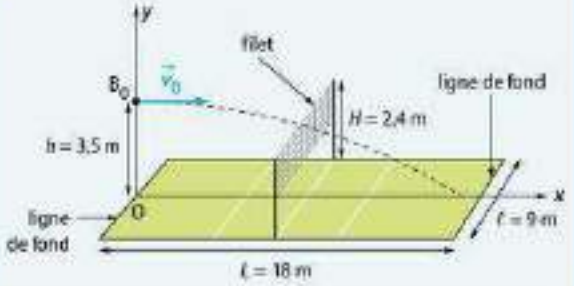
DOC 1 Trajectoire de la balle au service



Après la course d'élan, le serveur saute de façon à frapper le ballon en un point B_0 situé à la hauteur h au-dessus de la ligne de fond du terrain. La hauteur h désigne alors l'altitude initiale du centre du ballon. Le vecteur vitesse initiale du ballon est horizontal et perpendiculaire à la ligne de fond du terrain. Le service sera considéré comme valide à condition que le ballon franchisse le filet sans le toucher et qu'il retombe dans le terrain adverse.

DONNÉES

- Le ballon de volley-ball a une masse $m = 260$ g et un rayon $r = 10$ cm
- Intensité du champ de pesanteur : $g = 9{,}81\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$



DOC 2 La réception

Au moment où le joueur frappe le ballon, un joueur de l'équipe adverse est placé au niveau de la ligne de fond de son terrain. Il débute sa course vers l'avant pour réceptionner le ballon en réalisant une « manchette » comme le montre la photo ci-dessous. Le contact entre le ballon et le joueur se fait au point R situé à une hauteur de 80 cm au-dessus du sol.



QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Le mouvement du centre de masse du ballon est étudié muni du repère $(O ; x ; y)$ et l'instant de la frappe est choisi comme origine des temps : $t = 0$ s. Le service est effectué depuis le point B_0 à la vitesse $v_0 = 21{,}0\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

a. Établir l'expression du vecteur accélération du centre du ballon après la frappe.

b. Établir les équations horaires du mouvement du centre de masse du ballon et montrer que le mouvement est plan.

c. En déduire que l'équation de la trajectoire du ballon reliant ses coordonnées x_B et y_B s'écrit :

$$y_B(x) = -\frac{g}{2v_0^2}x_B^2 + h$$

2. La vitesse moyenne du déplacement du receveur est notée v_j. Exprimer en fonction de L, v_j et t l'équation horaire $x_j(t)$ du joueur receveur qui se déplace pour atteindre la position photographiée dans le document 2.

PROBLÉMATIQUE

Le service proposé ici sera-t-il valide ?
Si oui, le receveur dans les conditions du document 2 pourra-t-il rattraper le ballon de façon réaliste ?

35 Saut à ski DÉMARCHE DIFFÉRENCIÉE

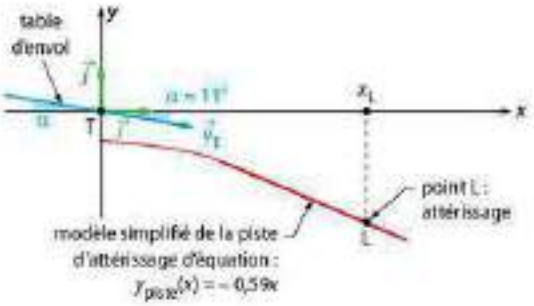
30 min

Présenter une démarche de manière argumentée, synthétique et cohérente

Un sauteur, assimilé à un point matériel, s'élance du tremplin au point T.
La piste d'atterrissage est modélisée par une droite d'équation $y = -0{,}59x$.
Le jour de l'épreuve, il atterrit au point L = 113 m qui correspond à l'abscisse $x_L = 97$ m.

Donnée : *Intensité de la pesanteur* $g_0 = 9{,}81\ m \cdot s^{-2}$; $v_T = 83{,}3\ km \cdot h^{-1}$





DÉMARCHE EXPERTE

Le modèle de la chute libre est-il adapté pour décrire le mouvement du sauteur ?

DÉMARCHE AVANCÉE

1. Dans le repère (T ; *x*, *y*, *z*), établir l'expression du vecteur accélération du sauteur au cours du mouvement en négligeant l'action de l'air.

2. Montrer en détaillant chaque étape de votre raisonnement, que les équations horaires du centre de masse du sauteur s'écrivent :

$$\begin{cases} x(t) = v_T \times \cos\alpha \times t \\ y(t) = \dfrac{-g_0}{2} \times t^2 - v_T \times \sin\alpha \times t \end{cases}$$

3. En déduire que l'équation de la trajectoire s'écrit :

$$y(x) = -9{,}5 \times 10^{-3} x^2 - 1{,}9 \times 10^{-1} x$$

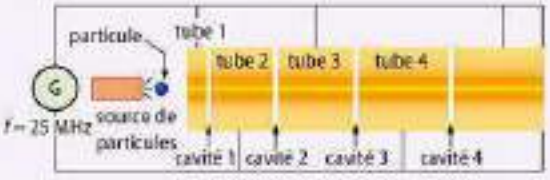
4. a. En déduire l'abscisse du point d'atterrissage x_L si on néglige l'action de l'air.

b. Conclure sur le type d'action exercée par l'air lors du saut.

VERS LE SUP'

36 Accélérateur linéaire de particules chargées

Les accélérateurs linéaires de particules sont constitués d'une succession de tubes disposés en ligne droite et placés sous vide. Les tubes sont alternativement chargés positivement et négativement pour qu'une particule chargée, en passant au tube suivant, soit soumise à un champ électrique accélérateur. À l'intérieur d'un tube chargé traversé par la particule, le champ électrique est nul. Par contre, il est maximal dans les cavités traversées par les particules entre les tubes.



Données : *énergie potentielle électrique* $E_{p(elec)} = q \times V$, $\mathcal{E} = 100\ kV \cdot m^{-1}$, $U_{AB} = \mathcal{E} \times d$ *fréquence du générateur* $f = 25$ *MHz, charge élémentaire* $e = 1{,}6 \times 10^{-19}$ *C, masse* $m = 1{,}7 \times 10^{-27}$ *kg.*

1. Justifier que le mouvement des particules chargées est rectiligne uniforme à l'intérieur des tubes. Où sont situées les zones d'accélération ?

2. À l'instant t_1, un proton se présente à la sortie du tube 1 devant la première cavité accélératrice de longueur $AB = 2{,}0$ cm. Sa vitesse v_A est négligeable.

a. Quel doit être le signe de la charge du tube 1 à cet instant ? Celui du tube 2 ?

b. Reproduire sur un schéma la première cavité et représenter le champ électrique $\vec{\mathcal{E}}$ et la force électrique $\vec{F}_e$ qui modélise l'action mécanique exercée sur le proton.

c. Exprimer le travail de la force électrique qui s'exerce entre A et B en fonction de $\mathcal{E}$, AB et e. Justifier que ce travail est maximal.

d. Exploiter le théorème de l'énergie cinétique pour montrer que $v_B = \sqrt{\dfrac{2\,eU_{AB}}{m}}$. Calculer v_B.

3. Le proton arrive à l'instant t_2, à la sortie du tube 2 devant la cavité accélératrice suivante.

a. Quel doit être le signe des charges électriques portées par le tube 2 à cet instant ? Pourquoi le générateur de tension est-il alternatif ?

b. Exprimer en fonction de la période T de la tension, la durée du trajet du proton dans le tube 2 de longueur l_2. En déduire la relation entre f, v_2 et l_2. Calculer l_2.

c. Pourquoi les tubes sont-ils de plus en plus longs ?

Lancer d'un ballon de basket

Contexte

L'objectif est de modéliser la trajectoire d'un ballon de basket au cours du temps, de déterminer les paramètres de lancement du ballon et enfin d'utiliser le modèle pour prédire si le ballon passera ou non à travers le panier.

Documents mis à disposition

VIDÉO
Lancer au basket
Flash PAGE vidéo



Extrait de la vidéo

Voici une image extraite d'une vidéo montrant un lancer au basket.

On cherche à déterminer les paramètres de lancement du ballon avec précision et prédire si le lancer sera ou non réussi.

Dans le repère $(O ; x, y)$, l'origine O correspond au centre de masse du ballon au moment du lancer. Dans ce repère, le panier de basket est à une altitude 0,53 m et une abscisse comprise entre 3,50 m et 3,95 m (par rapport à la position initiale du ballon).

***Données** : La distance entre la ligne du lanceur et le cercle dessiné au sol sous le premier est de 3,00 m. Le rayon du ballon est de 0,12 m ; intensité de la pesanteur $g_0 = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$*

Matériel mis à disposition

- Une « calculette type « collège » ou un ordinateur avec fonction « calculatrice »
- Un ordinateur muni d'un tableur grapheur
- Une vidéo tronquée du lancer franc.

Travail à effectuer

1. (ANAL) **Proposition de protocole expérimental** *(10 min conseillées)*

1. Visualiser la vidéo tronquée présentant le début du mouvement.
2. Proposer un protocole expérimental pour modéliser le mouvement du ballon au cours du temps.

Être en mesure de présenter le protocole

2. (REA) **Mise en œuvre du protocole expérimental proposé** *(20 min conseillées)*

1. Mettre en œuvre le protocole et effectuer l'acquisition des positions du ballon au cours du temps.
2. Représenter puis modéliser la courbe expérimentale de la trajectoire.

Être en mesure de présenter l'acquisition informatisée

3. (VAL) **Exploitation du résultat obtenu** *(30 min conseillées)*

1. Montrer que dans l'hypothèse où l'action de l'air est négligeable, le mouvement du ballon peut être décrit par un arc de parabole d'équation : $y(x) = \dfrac{-g_0}{2 \times v_0^2 \times \cos^2 \alpha} \times x^2 + x \times \tan \alpha$ où v_0 correspond à la valeur de la vitesse de lancement du ballon et α l'angle que forme le vecteur vitesse avec l'horizontale.
2. Confronter la modélisation aux résultats expérimentaux pour tester sa validité.
3. Déduire de la modélisation, les valeurs de v_0 en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ et de α en degré, paramètres de lancement du ballon.
4. Déterminer si le lancer sera réussi.
5. Identifier une source d'incertitude possible dans les mesures réalisées.

Défaire le montage et ranger la paillasse.

PISTE POUR LE GRAND ORAL PRÉPA BAC

Pour se préparer à l'Oral
➥ Livret LES CLÉS DU BAC
(en début de manuel)

UNE QUESTION

Comment un joueur de rugby peut-il anticiper la position du ballon ?

Enjeu de la question

Une meilleure compréhension de ce phénomène permettrait d'améliorer les performances sportives et de développer de nouveaux dispositifs automatiques de protection contre les projectiles.

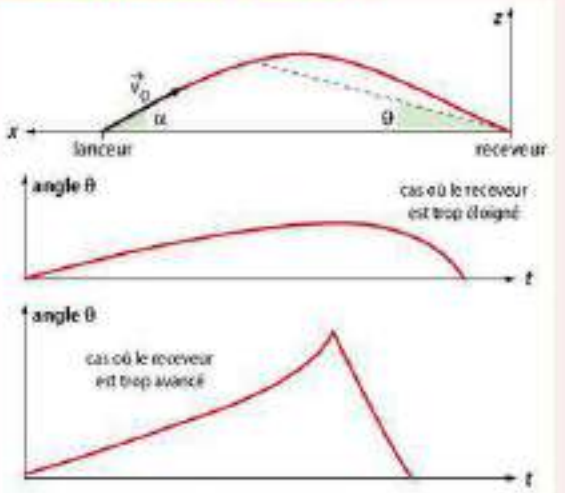
Proposition de plan de présentation

1. Un mouvement prévisible ? Mouvement d'un système assimilé à un point matériel en chute libre
2. Cas d'un jeu en conditions réelles : force de frottement, conditions climatiques... hypothèse(s) à reformuler
3. Une solution adoptée par les joueurs ... et les animaux. Discussion selon l'évolution de l'angle θ formé par le receveur, le ballon et l'horizontale.
4. Ouverture-Application à des dispositifs automatisés

Les mots-clés

lois de Newton ▸ mouvement dans un champ uniforme ▸ courbes paraboliques

Exemple de support de présentation



Cas de réception du ballon

QUESTIONS D'APPROFONDISSEMENT POSSIBLES



UN EXEMPLE DE PROJET PROFESSIONNEL

Les métiers relatifs à la pratique sportive sont des métiers d'avenir : Paris organise les jeux olympiques en 2024. Pour travailler dans ce domaine, des formations sont proposées à l'université ou par le ministère des Sports.

Après le bac : *Niveau Bac : brevet professionnel de la jeunesse, de l'éducation populaire et du sport ; Bac + 3 : licence STAPS (sciences et techniques des activités physiques et sportives.*

Autres métiers : *journaliste sportif, médecin du sport, kinésithérapeute du sport, diététicien, professeur d'EPS...*

L'éducateur sportif initie ou entraîne des publics variés dans une ou plusieurs disciplines. Son champ d'activité dépend de ses qualifications et de son cadre d'exercice. Beaucoup exercent dans les clubs sportifs et cumulent plusieurs emplois ou exercent parallèlement une autre activité professionnelle, sportive ou tout autre.



Mouvement dans

Avant d'aborder le chapitre EN AUTONOMIE

LES ACQUIS INDISPENSABLES

■ 1re Enseignement de spécialité ■ 1re Enseignement scientifique

■ Le **référentiel géocentrique** est constitué par le centre de la Terre et trois axes qui pointent vers des étoiles assez lointaines pour être considéré comme fixe.

■ Le **référentiel héliocentrique** est constitué par le centre du Soleil et trois axes qui pointent vers des étoiles assez lointaines pour être considéré comme fixe.

■ La **force d'interaction gravitationnelle** modélise l'interaction à distance entre deux systèmes A et B de masse respectives m_A et m_B :

expressions vectorielles des forces modélisant l'interaction entre A et B (valeur de F en N) ; masse de A et B (en kg)

$$\vec{F}_{A/B} = -\vec{F}_{B/A} = G\frac{m_A \cdot m_B}{d^2}\vec{u}_{BA}$$

constante de gravitation universelle $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ N · m² · kg⁻² ; distance entre A et B (en m) ; vecteur unitaire porté par la droite (AB) et orienté de B vers A

■ **2e loi de Newton** (chap 11).

résultante des forces ; masse du système ; accélération du centre de masse

$$\sum \vec{F}_{\text{extérieur/système}} = m \cdot \vec{a}_G$$

■ Dans le **repère** dit **de Frenet** $(M, \vec{\tau}, \vec{n})$ pour un mouvement circulaire on a les relations suivantes (chap 10).



$$\vec{v} = v\vec{\tau} = \begin{pmatrix} v \\ 0 \end{pmatrix} \quad \vec{a} = \frac{v^2}{R}\vec{n} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{v^2}{R} \end{pmatrix}$$

d'où : $a = \frac{v^2}{R}$

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

Pour chaque situation, rédiger une réponse qui explique en quelques lignes le raisonnement.

SITUATION 1

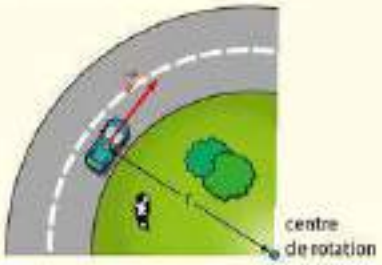


Titan est un satellite de Saturne. Quelle force maintient Titan autour de Saturne ? Quel type de trajectoire Titan est-il susceptible d'avoir ?

SITUATION 2

Une voiture tourne sur un rond-point à vitesse constante de 50 km · h⁻¹ et décrit une trajectoire circulaire d'un rayon de 50 m.

Déterminer la valeur de l'accélération puis la tracer sur un schéma.



CHAPITRE

13

PHYSIQUE

un champ de gravitation



La planète Terre a une masse de $6{,}0 \times 10^{24}$ kg et possède un seul satellite naturel, la Lune. Sachant que la période de révolution de la Lune autour du Soleil est de 27 jours, comment déterminer le rayon de son orbite autour de la Terre et la valeur de sa vitesse et de son accélération ?

→ EXERCICE 35

NOTIONS ET CONTENUS

- Mouvement des satellites et des planètes. Orbite. Période de révolution.
- Lois de Kepler.
- Satellite géostationnaire.

CAPACITÉS EXPÉRIMENTALES ET NUMÉRIQUES

- Exploiter, à l'aide d'un langage de programmation, des données astronomiques ou satellitaires pour tester les deuxième et troisième lois de Kepler.

→ Activités 2, 3 et 4

COMPÉTENCES :
APP Rechercher et organiser l'information
ANALYSE Choisir un modèle pertinent

Le système solaire à travers les siècles

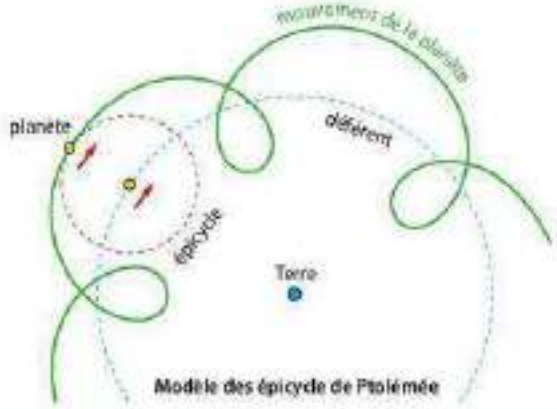
Différents modèles de représentation ont ainsi émergé au fil des siècles, reflétant l'évolution de notre conception du système solaire.

DOC 1 Le modèle d'Aristote

Aristote (384 av. J.-C. –322 av. J.-C.) est un philosophe, mathématicien et astronome grec de l'antiquité, construit par la pensée un modèle du monde qui l'entoure. L'univers est fini et la Terre sphérique est placée au centre d'un système où tourne d'abord la Lune, puis les planètes en cercles concentriques. Ce modèle peine néanmoins à expliquer les trajectoires rétrogrades de certaines planètes comme Mars, à justifier les variations de vitesse et d'intensité lumineuse émises de ces planètes.

DOC 2 Le modèle de Ptolémée

L'astronome grec Claude Ptolémée (IIe siècle apr. J.-C.) se place dans la continuité d'Aristote et construit un modèle géocentrique plus complet et surtout permettant d'interpréter la rétrogradation de certaines planètes. Le cercle reste la figure géométrique essentielle, la planète tourne selon un déférent autour d'un épicycle. Un exemple de représentation est donné ci-dessous.



Modèle des épicycle de Ptolémée

DOC 3 Le modèle de Copernic

Nicolas Copernic (1473–1523) reprend l'idée longtemps oublié d'un système héliocentrique. Les orbites des planètes sont des cercles. Ce modèle est incomplet car il ne permet pas d'expliquer les variations de vitesse des planètes.



DOC 4 Kepler et l'orbite elliptique

Johannes Kepler (1571–1630) utilise des relevés d'observations accumulés durant des années par l'astronome danois Tycho Brahe (1546–1601) pour décrire un nouveau modèle du système solaire basé sur l'héliocentrisme. Les orbites ne sont plus circulaires mais elliptiques, le Soleil étant placé à un des foyers de l'ellipse, ce qui lui permet d'expliquer la variation de vitesse des planètes. Il énonce alors trois lois, sans les démontrer ; elles lui permettent de prévoir avec une grande précision la position des différentes planètes.

Isaac Newton (1643–1727) valide définitivement les lois de Kepler en les démontrant. Il ouvre ainsi la voie à une explication et prédictions des phénomènes d'astronomie.

EXPLOITATION ET ANALYSE

1 a. Indiquer quels sont les phénomènes que le modèle d'Aristote ne permet pas d'expliquer simplement.

b. Schématiser le système géocentrique du modèle d'Aristote avec la Lune et quelques planètes.

2 a. Dans le modèle Ptolémée les épicycles et déférents sont-ils des trajectoires ?

b. Quel phénomène essaie-t-il de montrer avec ce type d'artifice mathématique.

3 Pourquoi le modèle de Copernic ne permet pas d'expliquer la variation de vitesse d'une planète ?

4 Quelle différence y a-t-il entre le modèle de Copernic et celui de Kepler ?

VOCABULAIRE

Une **planète rétrograde** est une planète dont le mouvement apparent semble s'inverser.

SYNTHÈSE

5 Donner les éléments essentiels qui caractérisent le système solaire d'après Kepler.

Je réussis si...

- **Je sais extraire les éléments importants des documents.**
- **Je sais modéliser le système solaire d'après Kepler.**

TP

COMPÉTENCES :
(REA) Utiliser un modèle
(APP) Schématiser une situation

Orbite de Mercure

Dans cette activité, on se propose de vérifier la première loi de Kepler en utilisant un simulateur d'orbite créé à l'aide d'un langage de programmation.

DOC 1 Simulateur d'orbite

Le programme modélise l'orbite de Mercure dont la position est repérée à intervalle de temps constant. Il est adaptable à d'autres planètes du système solaire.

N correspond au nombre de positions mesurées.

```
import matplotlib.pyplot as plt
import math as m
import scipy.optimize as op
#déclaration des listes
t,M,u,theta,R,X,Y = [],[],[],[],[],[],[]
# Données d'astronomie
T_rev = 0.240 #période de révolution (an)
e = 0.206 # excentricité
a = 0.387# demi grand axe en (UA)
N = 40 # Nombre de position
# résolution des équations de Kepler
for i in range(N):
    t.append(i*T_rev /N)
    M.append(2*m.pi/T_rev *t[i])
    u.append(float(op.fsolve (lambda x:x-e*m.
  sin(x)-M[i],0) ))
# Calcul des coordonnées
    theta.append(2*m.atan((m.sqrt((1+e)/
  (1-e))*m.tan(u[i]/2))))
    R.append(a*(1-e**2)/(1+e*m.cos(theta[i])))
    X.append(R[i]*m.cos(theta[i]))
    Y.append(R[i]*m.sin(theta[i]))
#affichage de l'orbite
plt.grid(True)
plt.xlabel("distance (U.A)")
plt.ylabel("distance (U.A)")
plt.axis('equal')
plt.plot(X,Y,"bo")
plt.plot(0,0,"go")
plt.show()
```

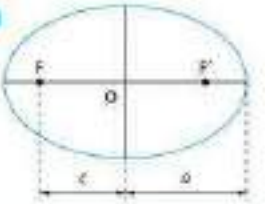
DOC 2 Caractéristiques d'une orbite elliptique

Les orbites des planètes autour du Soleil ne sont pas des cercles, mais des ellipses. Un cercle est caractérisé par son centre C et son rayon r (A), tandis qu'une ellipse est caractérisée par son centre O, son demi-grand axe a, ses deux foyers F et F', et son **excentricité** $e = c/a$, où $c = OF = OF'$ (B). Le Soleil occupe l'un des deux foyers de cette ellipse. La position de la planète au plus proche du Soleil est appelée **périhélie** et l'**aphélie** le point le plus lointain.

A



B



DOC 3 Données planétaires

Planète	a (U.A)	T (an)	e
Mercure	0,387	0,240	0,206
Vénus	0,723	0,615	0,007
Terre	1,00	1,00	0,017
Mars	1,52	1,88	0,093
Jupiter	5,20	11,9	0,048
Saturne	9,54	29,4	0,054
Uranus	19,2	84,0	0,046
Neptune	30,0	165	0,010

U.A : l'unité astronomique, elle correspond à la distance moyenne entre la Terre et le soleil soit 150 millions de km.

EXPLOITATION ET ANALYSE

1 Lancer le programme pour la planète Mercure.

a. Dans quel référentiel considéré galiléen est représentée son orbite ?

b. À quelle distance du Soleil se trouve l'aphélie de Mercure ? son périhélie ?

c. En utilisant la représentation obtenue par la simulation, déterminer la vitesse à l'aphélie et périhélie de Mercure.

2 En faisant évoluer le programme, on peut identifier les planètes dont l'orbite est proche d'un cercle. Pour cela, il suffit de changer les données (valeur demi-grand axe a, excentricité, période de révolution) des différentes planètes dans le code. On peut aussi modifier le nombre N de positions affichées.

a. Dans ce cas, de quelle valeur est proche l'excentricité e ?

b. Donner les noms des planètes concernées.

c. Que peut-on dire de la vitesse de ces planètes ?

CONCLUSION

3 Représenter sur un schéma quelques vecteurs vitesses et accélérations de la planète étudiée :

- dans le cas de Mercure ;
- dans le cas d'une planète ayant une orbite quasi-circulaire.

Je réussis si...

- **Je sais repérer les orbites elliptiques et leurs caractéristiques.**
- **Je sais mettre en évidence la variation de vitesse sur une orbite elliptique.**

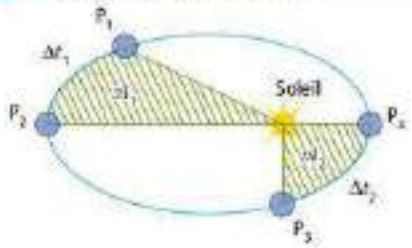
TP

COMPÉTENCES :
(RÉA) Mettre en œuvre les étapes d'une démarche
(VAL) Confronter un modèle à des résultats expérimentaux

La comète de Halley

La deuxième loi de Kepler est complexe à vérifier par l'expérience, aussi l'outil informatique permet de modéliser le calcul de l'aire balayée par une trajectoire comme dans l'étude de la comète de Halley.

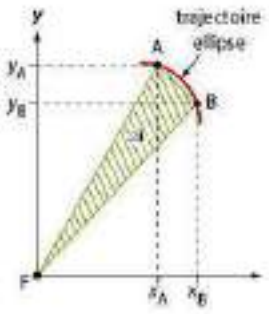
DOC 1 Deuxième loi de Kepler



On appelle $\mathcal{A}_1$ et $\mathcal{A}_2$ des aires balayées par le rayon vecteur partant du Soleil vers la planète durant les intervalles de temps Δt_1 et Δt_2.
D'après la 2e loi de Kepler (loi des aires) : si les durées de parcours sont identiques $\Delta t_1 = \Delta t_2$ alors $\mathcal{A}_1 = \mathcal{A}_2$.

DOC 2 Principe de calcul d'une aire balayée

Pour calculer l'aire balayée, on estime l'aire d'un triangle. Cette approximation reste correcte si les instants considérés sont proches.



L'aire du triangle $\mathcal{A}$ est calculée en utilisant le demi-périmètre :

$$p = \frac{AF + AB + FB}{2}$$

et la formule de Héron telle que :

$$\mathcal{A} = \sqrt{p(p - AF)(p - AB)(p - FB)}$$

avec AF, AB et FB les longueurs du triangle.

DOC 3 Programme de calcul des aires balayées

La portion de programme du calcul des aires balayées est à insérer dans les lignes de codes du programme de l'activité précédente (qui permet de représenter à l'aide d'un langage de programmation l'orbite d'une planète), juste avant la partie correspondant l'affichage de l'orbite. Les intervalles de temps sont modifiables en changeant les dates de mesures.

```
# Aires des triangles
# t1,t1 dates première aire et t2, t3 date de la seconde aire
t1,t2 = 0,2
t3,t4 = 10,12
#calcul de l'aire balayée entre t0 et t1
Delta_t1 =t2-t1
AIRE1,AIRE2 = 0,0
i1,i2 = 0,0
for i1 in range(Delta_t1):
  long1 = m.sqrt((X[t1+i1])**2+(Y[t1+i1])**2)
  long2 = m.sqrt((X[t2+i1])**2+(Y[t2+i1])**2)
  long3 = m.sqrt((X[t2+i1]-X[t1+i1])**2+(Y[t2+i1]-Y[t1+i1])**2)
  S_1 = 1/2*(long1+long2+long3)
  AIRE1 = m.sqrt(S_1*(S_1-long1)*(S_1-long2)*(S_1-long3))+AIRE1
#calcul de l'aire balayée entre t2 et t3
Delta_t2 =t4-t3
for i2 in range(Delta_t2):
  long1b = m.sqrt((X[t3+i2])**2+(Y[t3+i2])**2)
  long2b = m.sqrt((X[t4+i2])**2+(Y[t4+i2])**2)
  long3b =m.sqrt((X[t4+i2]-X[t3+i2])**2+(Y[t4+i2]-Y[t3+i2])**2)
  S_1b = 1/2*(long1b+long2b+long3b)
  AIRE2 =m.sqrt(S_1b*(S_1b-long1b)*(S_1b-long2b)*(S_1b-long3b))
  +AIRE2
print('aire balayée entre t1 et t2 --> ' + str(AIRE1))
print('aire balayée entre t3 et t4 --> ' + str(AIRE2))
```

DOC 4 La comète de Halley

La comète de Halley possède une période de révolution de 76,09 années autour du Soleil, son excentricité est de 0,967 et la valeur du demi-grand axe est de 17,83 UA.



EXPLOITATION ET ANALYSE

1 Repérer dans le programme les parties concernant : le calcul de la longueur de chaque segment, le calcul du demi-périmètre et la formule de Héron.

2 Vérifier pour plusieurs planètes (en utilisant les données planétaires du doc. 3 de l'activité 2) et différentes dates, que la 2e loi de Kepler est vérifiée.

3 a. Pour une comète comme celle de Halley, les variations de vitesses observées sur son orbite sont-elles compatibles avec la 2e loi de Kepler ?

b. Justifier que la mesure des aires balayées est fortement imprécise dans le cas de la comète de Halley. Montrer, en justifiant, que l'on peut résoudre ce problème en modifiant certains paramètres du programme.

CONCLUSION

4 La deuxième loi de Kepler est-elle applicable à tous les astres ?

Je réussis si...

- **Je sais repérer les expressions mathématiques dans le code.**
- **Je sais vérifier la deuxième loi de Kepler à l'aide du programme.**
- **Je sais reconnaître les limites de l'approximation.**

COMPÉTENCES :
(RÉA) Utiliser un modèle
(ANA/RÉA) Faire des prévisions à l'aide d'un modèle

La masse de Jupiter

La loi des périodes ou troisième loi de Kepler s'applique non seulement au système solaire mais aussi aux systèmes satellitaires.

DOC 1 Expression de la 3e loi de Kepler

Après l'énoncé de la loi des périodes par Johannes Kepler, Isaac Newton la démontre et l'écrit ainsi :

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M} = \text{constante.}$$

Où T est la période de révolution de l'astre sur son orbite, a la valeur du demi-grand axe de l'orbite, G est la constante de gravitation universelle : $G = 6{,}67 \times 10^{-11}$ m^3 · kg^{-1} · s^{-2} et M la masse, en kg, de l'astre attracteur (le Soleil dans le cas du système solaire).

DOC 2 Jupiter et ses satellites



Jupiter est la planète la plus grande et massive du système solaire ; sa masse est de $1{,}898 \times 10^{27}$ kg. Jupiter possède de nombreux satellites ; quelques-uns de ses satellites ainsi que leurs caractéristiques (demi-grand axe, excentricité et période de révolution) sont donnés ci-dessous.

Planètes	a ($\times 10^3$ km)	e	T (jour)
Amalthée	181	0,0031	0,498
Thébé	221	0,0177	0,674
Io	421	0,0041	1,769
Europe	671	0,0094	3,551
Ganymède	1 070	0,0011	7,155
Callisto	1 882	0,0074	16,689

DOC 3 Régression linéaire

La régression linéaire est une méthode statistique permettant de trouver l'équation d'une fonction affine à partir d'un nuage de points issu de mesures. Le modèle est validé, si le coefficient de corrélation est proche de 1 ou –1, 0,999... est une valeur convenable.

En langage Python, l'instruction `(stat.linregress())` permet de trouver le coefficient directeur, l'ordonnée à l'origine et le coefficient de corrélation, valeurs stockées dans un tableau de trois valeurs.

DOC 4 Programme « vérification de la 3e loi de Kepler »

Le programme suivant permet de vérifier la 3e loi de Kepler pour le système solaire. Il est adaptable à d'autres systèmes notamment les systèmes satellitaires.

```
import matplotlib.pyplot as plt
import scipy.stats as stat
# listes des demi-grands axes a en U.A et périodes
  des planètes en années
LIST_a = [0.39,0.72,1,1.5,5.2,9.5,19.2,30]
LIST_T = [0.24,0.615,1,1.88,11.9,29.4,84,165.0]
LIST_P = ['Mercure','Venus','Terre','Mars',
  'Jupiter','Saturne','Uranus','Neptune']
# a au cube et T au carré
for i in range(0, len(LIST_a)):
    LIST_a[i] = (LIST_a[i]*150e9)**3
    LIST_T[i] = (LIST_T[i]*365*24*3600)**2
# régression linéaire
regression = stat.linregress(LIST_a,LIST_T)
pente =regression[0]
print('pente --> '+str(pente))
ordorigine =regression[1]
print('ordonnée à l origine --> '+str(ordorigine))
coeffcorel = regression[2]
print('coefficient de corrélation -->
  '+str(coeffcorel))
#affichage point et droite de regression
a_3_max = LIST_a[len(LIST_a)-1]
T_2_max =pente *a_3_max + ordorigine
plt.grid(True)
plt.xlabel(' a au cube (m3)')
plt.ylabel('periode au carré (s2)')
plt.scatter(LIST_a,LIST_T,s = 100,c ='red',
  marker ='+')
for i in range (0,len(LIST_a)):
  plt.text(LIST_a[i],LIST_T[i], LIST_P[i],fontsize =8)
plt.plot ([0,a_3_max],[ordorigine,T_2_max],c ='blue')
plt.show()
```

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1 Lancer le programme pour le système solaire.

2 Tester la 3e loi de Kepler en vérifiant la proportionnalité entre T^2 et a^3.

PROBLÈME À RÉSOUDRE

3 a. Adapter le programme aux satellites de Jupiter.

b. Mettre en œuvre une stratégie pour déterminer la masse de Jupiter.

c. Comparer la valeur de la masse trouvée par cette stratégie à celle donnée dans le document 2.

Je réussis si...

- Je sais vérifier la troisième loi de Kepler pour le système solaire.
- Je sais adapter le programme pour le système satellitaire de Jupiter
- Je sais déterminer la valeur de la masse de Jupiter.

1 Mouvements des planètes, des satellites et lois de Kepler

Définition d'une orbite

Les astres décrivent des trajectoires, lorsqu'ils tournent autour d'un astre attracteur, elles sont appelées orbites.

L'**orbite** d'une planète ou d'un satellite désigne la trajectoire de son centre de masse dans le référentiel lié au centre de l'astre attracteur.
Pour le soleil le référentiel est héliocentrique.

Définition d'une période de révolution

La période de révolution T d'une planète ou d'un satellite est la durée nécessaire pour parcourir l'ensemble de son orbite.

Lois de Kepler

Au XVII[e] siècle, Johannes Kepler (FIG. 1) constate que les planètes tournent autour du Soleil selon des trajectoires qui ne sont pas parfaitement circulaires et énonce trois lois pour décrire leur mouvement.

1re loi de Kepler ou loi des orbites : dans le référentiel héliocentrique, l'orbite d'une planète est une ellipse (FIG. 2) et le centre du Soleil occupe un des deux foyers.
2e loi de Kepler ou loi des aires : le segment reliant le Soleil à la planète balaye des aires égales pendant des durées égales (FIG. 3).

La vitesse d'une planète n'est donc pas constante : elle augmente lorsque la planète se rapproche du Soleil et diminue lorsqu'elle s'en éloigne.

Remarque. Une orbite est circulaire si le foyer et le centre de l'ellipse sont confondus. La distance entre le centre du Soleil et la planète est alors constante et représentée par le rayon du cercle. Ainsi, d'après la deuxième loi de Kepler les aires balayées sont identiques pendant des durées égales, donc les arcs de cercles parcourus sont égaux et donc la vitesse est constante sur l'ensemble de l'orbite circulaire.

3e loi de Kepler ou loi des périodes : la période de révolution T au carré est proportionnelle au cube du demi-grand axe a.
Ce qui s'écrit :

$$\frac{T^2}{a^3} = k = \text{constante}$$

(T : période (s) ; a : demi-grand axe (m))

La constante de la 3e loi de Kepler ne dépend que de l'astre attracteur :
$k = \frac{4\pi^2}{G \cdot M}$, avec $G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$ constante universelle de gravitation, et M la masse (en kg) de l'astre attracteur.



FIG. 1 Portrait de Johannes Kepler (1571-1630).

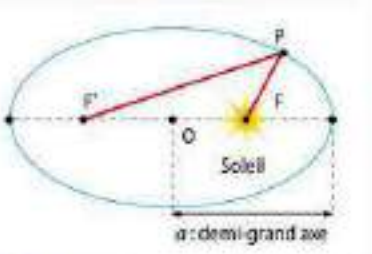


FIG. 2 Le centre d'une planète P décrit une ellipse de foyer F et F' (à chaque instant PF + PP' = 2a).

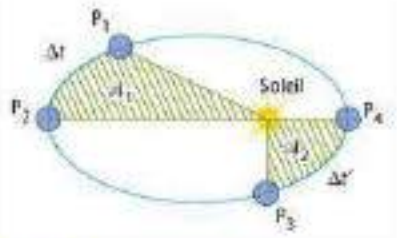


FIG. 3 Si les durées Δt et $\Delta t'$ sont égales, alors les aires balayées par la planète $\mathcal{A}_1$ et $\mathcal{A}_2$ sont égales.

VOCABULAIRE

- Le **périapside** et l'**apoapside** sont des termes désignant deux points particuliers d'une orbite d'un objet gravitant autour d'un astre attracteur. Il s'agit respectivement de la position la plus proche et de la plus éloigné de l'astre attracteur.
- Pour la Terre ces points sont appelés **périgée** et l'**apogée**, pour le Soleil les termes utilisés sont le **périhélie** et **aphélie**.

2 Cas des mouvements circulaires

Dans le référentiel lié au centre d'un astre attracteur et dans des conditions d'approximations de trajectoires assimilées à des trajectoires circulaires, la planète ou le satellite de centre S et de masse m tourne autour de l'astre attracteur de masse M, selon une orbite circulaire de rayon r.

La planète ou le satellite n'est soumis qu'à l'action mécanique exercée par l'astre attracteur qui se modélise par la force gravitationnelle.

D'après la deuxième loi de Newton, on peut écrire :

$\vec{F}_{O/S} = m \cdot \vec{a}$ or $\vec{F}_{O/S} = G\dfrac{m \cdot M}{r^2}\vec{n}$ ainsi $G\dfrac{m \cdot M}{r^2}\vec{n} = m \cdot \vec{a}$. Soit $\vec{a} = G\dfrac{M}{r^2}\vec{n}$.

Une planète ou un satellite tournant autour de son astre attracteur a un vecteur accélération dirigé vers le centre de sa trajectoire circulaire. Le **vecteur accélération** est donc **radial et centripète** (FIG. 4).

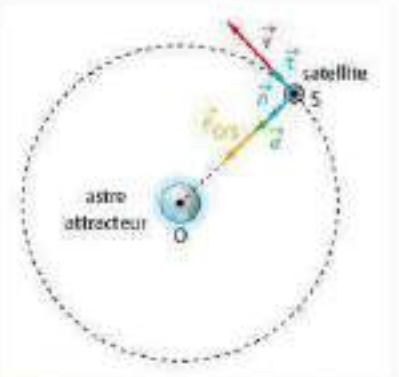


FIG. 4 Accélération et vitesse sur une orbite circulaire.

L'accélération dans le repère de Frenet s'écrit : $\vec{a} = \dfrac{dv}{dt} \cdot \vec{\tau} + \dfrac{v^2}{r} \cdot \vec{n}$

L'expression trouvée précédemment impose que le terme $\dfrac{dv}{dt} \cdot \vec{\tau} = \vec{0}$ et donc que $\dfrac{dv}{dt} = 0$. La vitesse est donc constante.

Une planète ou un satellite possède une vitesse constante sur une orbite circulaire. Le **mouvement** est dit **circulaire** et **uniforme**.
L'accélération a pour expression :

vitesse du satellite ou planète ($m \cdot s^{-1}$)
vecteur accélération ($m \cdot s^{-2}$) $\vec{a} = \dfrac{v^2}{r} \cdot \vec{n}$ vecteur unitaire du repère de Frenet radial et centripète
rayon du cercle (m)

La vitesse est perpendiculaire à l'accélération et s'écrit :
$\vec{v} = v \cdot \vec{\tau}$ où $\vec{\tau}$ est le vecteur unitaire dans le repère de Frenet tangent à la trajectoire (FIG. 4).

Vitesse d'une planète ou d'un satellite

D'après ce qui précède, le mouvement étant circulaire et uniforme, on a :
$a = \dfrac{G \cdot M}{r^2} = \dfrac{v^2}{r}$ donc : $v = \sqrt{\dfrac{G \cdot M}{r}}$.

La **vitesse** d'une planète ou d'un satellite sur une orbite circulaire autour d'un astre attracteur est :

constante universelle de gravitation
$G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$
vitesse ($m \cdot s^{-1}$) $v = \sqrt{\dfrac{G \cdot M}{r}}$ masse (kg) de l'astre attracteur
rayon du cercle (m)

Dans le cas d'un satellite terrestre, le référentiel est géocentrique et on note : $r = R_T + h$, où R_T désigne le rayon terrestre ($R_T = 6{,}37 \times 10^6$ m) et h l'altitude du satellite (FIG. 5).

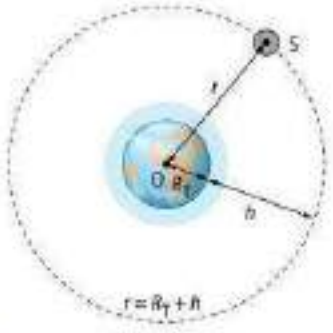


FIG. 5 L'altitude du satellite est notée h.

Période de révolution

Si l'orbite décrite par une planète ou un satellite est un cercle de rayon r, la distance parcourue pendant une durée T est la circonférence du cercle $2\pi r$.

On en déduit que donc que : $v = \dfrac{2\pi r}{T} = \sqrt{\dfrac{G \cdot M}{r}}$ et donc $T = 2\pi\sqrt{\dfrac{r^3}{G \cdot M}}$.

La **période de révolution** T d'une planète ou d'un satellite sur une orbite circulaire autour d'un astre attracteur est :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{G \cdot M}}$$

- T : période de révolution (s)
- r : rayon du cercle (m)
- M : masse (kg) de l'astre attracteur
- G : constante universelle $G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$

EXEMPLE

Un satellite (FIG. 6) orbite autour de la Terre en décrivant une trajectoire circulaire de rayon $r = 7{,}23 \times 10^6$ m, sachant que la masse de la Terre est $M_T = 5{,}97 \times 10^{24}$ kg, alors la période est :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{(7{,}23 \times 10^6)^3}{6{,}67 \times 10^{-11} \times 5{,}97 \times 10^{24}}} = 6{,}12 \times 10^3 \text{ s soit } 1{,}70 \text{ h.}$$



FIG. 6 Exemple de satellite.

De la période à la troisième loi de Kepler

En élevant au carré la relation précédente, cela permet d'écrire que :

$$T^2 = 4\pi^2 \frac{r^3}{G \cdot M}$$

On retrouve alors la relation $\dfrac{T^2}{r^3} = \dfrac{4\pi^2}{G \cdot M}$ correspondant à la troisième loi de Kepler pour un mouvement circulaire.

3 Les satellites géostationnaires

Les satellites géostationnaires possèdent la particularité d'être toujours positionnés au-dessus du même point de la surface de la Terre. Par conséquent, ils doivent tourner à la même vitesse que celle de la Terre et l'orbite doit être placée sur le plan équatorial pour posséder le même axe de rotation (FIG. 7).

L'altitude d'une telle orbite peut se déterminer par la relation de la période telle que : $T = 2\pi\sqrt{\dfrac{(R_T + h)^3}{G \cdot M}}$ donc $h = \left(\dfrac{T^2}{4\pi^2} G \cdot M\right)^{\frac{1}{3}} - R_T$

La période de rotation sidérale de la Terre est de 23 h 56 min 4 s, soit $T = 86\,204$ s

$$h = \left(\frac{(86\,204)^2}{4\pi^2} \times 6{,}67 \times 10^{-11} \times 5{,}97 \times 10^{24}\right)^{\frac{1}{3}} - 6{,}37 \times 10^6 = 3{,}59 \times 10^7 \text{ m}$$

Un satellite géostationnaire est placé sur une orbite située à environ 36 000 km de la Terre sur son plan équatorial.

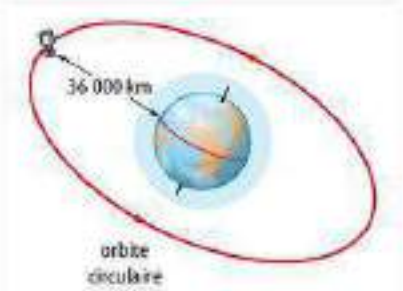


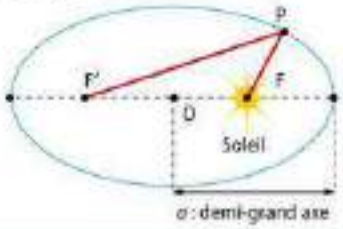
FIG. 7 Orbite d'un satellite géostationnaire.

VOCABULAIRE

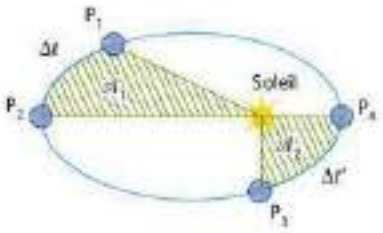
- La période sidérale, est la durée nécessaire pour que l'astre retrouve la même position par rapport aux étoiles considérées comme fixes.

1 Mouvements des planètes, des satellites et lois de Kepler

1re loi de Kepler ou loi des orbites : dans le référentiel héliocentrique, l'orbite d'une planète est une ellipse et le centre du soleil occupe un des deux foyers.



2e loi de Kepler ou loi des aires : le segment reliant le Soleil à la planète balaye des aires égales pendant des durées égales.



Si les durées Δt et $\Delta t'$ sont égales, alors les aires balayées par la planète $\mathcal{A}_1$ et $\mathcal{A}_2$ sont égales.

3e loi de Kepler ou loi des périodes :

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M} = \text{constante}$$

T : période (s) ; a : demi-grand axe (m) ; $G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$: constante universelle de gravitation ; M : la masse de l'astre attracteur (kg)

2 Cas des mouvements circulaires

Pour un mouvement circulaire et uniforme dans le repère de Frenet $(S, \vec{\tau}, \vec{n})$:

$$\vec{v} = v \cdot \vec{\tau} \quad \text{et} \quad \vec{a} = \frac{v^2}{r}\vec{n}$$

Avec la deuxième loi de Newton, on obtient :

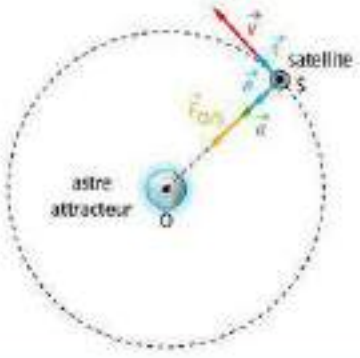
$$\vec{a} = G\frac{M}{r^2}\vec{n}$$

Le vecteur accélération est **radial** et **centripète**.
La vitesse d'une planète ou d'un satellite autour d'un astre attracteur est définie par :

$$v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}}$$

La période de révolution d'une planète ou d'un satellite autour d'un astre attracteur s'écrit :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{G \cdot M}}$$



Orbite circulaire de rayon r (m) d'un satellite ou d'une planète de masse M (kg).

3 Les satellites géostationnaires

Les **satellites géostationnaires** possèdent la particularité d'être toujours positionnés au-dessus du même point de la surface de la Terre.

Vérifier l'essentiel

EN AUTONOMIE

Pour chaque question, choisir la ou les bonnes réponses. ➥ SOLUTIONS EN PAGE 593

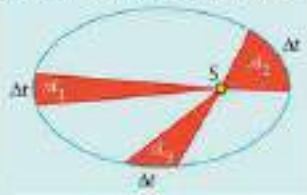
Flash PAGE corrigés détaillés

Flash PAGE QCM interactifs

DONNÉES

- Constante de gravitation universelle $G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$, rayon terrestre $R_T = 6{,}4 \times 10^3$ km, masse de la Terre $M_T = 5{,}97 \times 10^{24}$ kg.

1 Mouvements des planètes, des satellites et lois de Kepler

	A	B	C
1 Les planètes décrivent une ellipse dans le référentiel :	géocentrique.	terrestre.	héliocentrique.
2 D'après la 1re loi de Kepler, le Soleil est situé :	au centre de l'ellipse.	à l'un des foyers de l'ellipse.	sur l'orbite.
3 La troisième loi de Kepler s'écrit :	$T^3 = k \cdot a^2$	$T^2 = k \cdot a^3$	$k = \dfrac{a^3}{T^2}$
4 La deuxième loi de Kepler impose pour une orbite circulaire que :	la vitesse augmente ou diminue sur certaines portions de l'orbite.	l'accélération est nulle.	la valeur de la vitesse est constante.
5 On considère une planète en orbite autour du Soleil représentée par le schéma ci-dessous. On peut dire que : 	les aires $\mathcal{A}_1$, $\mathcal{A}_2$ et $\mathcal{A}_3$ ne sont pas égales.	les aires $\mathcal{A}_1$ et $\mathcal{A}_2$ sont égales mais pas celle de $\mathcal{A}_3$.	les trois aires sont égales $\mathcal{A}_1 = \mathcal{A}_2 = \mathcal{A}_3$.

2 Cas des mouvements circulaires

	A	B	C
6 Dans le cas d'une orbite circulaire.	La vitesse est constante.	L'accélération est radiale, centripète et constante.	L'accélération est nulle.
7 L'expression de la vitesse sur une orbite circulaire.	$v = \sqrt{\dfrac{r}{G \cdot M}}$	$v = \left(\dfrac{G \cdot M}{r}\right)^{\frac{1}{2}}$	$v = \sqrt{\dfrac{G \cdot M}{r}}$
8 Un satellite à une orbite circulaire à une altitude de 800 km. Quelle est la période de révolution de ce Satellite ?	$T = 43\,920$ s	$T = 6\,083$ s	$T = 9\,067$ s

3 Les satellites géostationnaires

	A	B	C
9 La période de révolution d'un satellite géostationnaire est correspondante à :	la période sidérale de la Terre.	la période de rotation de la Terre.	la période correspondant un jour solaire.
10 Un satellite est géostationnaire si :	il est placé à une altitude de 36 000 km et sur le plan équatorial terrestre.	le satellite est synchrone avec la rotation terrestre.	le satellite est sur le plan équatorial à une altitude quelconque.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Acquérir les bases

1 Mouvements des satellites, des planètes et lois de Kepler

EN AUTONOME

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Mouvement des satellites et des planètes. Les lois de Kepler.

- Montrer que l'orbite d'un satellite ou d'une planète est une ellipse dont le foyer est occupé par l'astre attracteur.
- Utiliser la deuxième loi de Kepler pour montrer la variation de vitesse sur une orbite.
- Montrer la proportionnalité énoncée dans la 3e loi de Kepler avec des données astronomiques.
- Utiliser la relation $\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M}$ pour trouver la période de révolution, la masse de l'astre attracteur ou la valeur du demi-grand axe

Acquérir les bases : 11 12 13 14 S'entraîner : 28 31

11 Lois de Kepler

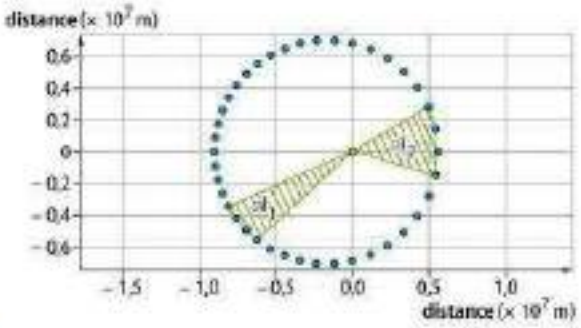
1. Donner la définition d'un référentiel planétocentrique.

2. Énoncer les trois lois de Kepler dans un référentiel planétocentrique pour un satellite.

3. On considère que ce satellite a une trajectoire circulaire.
a. Que peut-on alors déduire de la deuxième loi de Kepler ?
b. Écrire la relation de la 3e loi de Kepler dans ce cas ?

12 Thémisto satellite de Jupiter

Thémisto est un des satellites de Jupiter. La simulation de la trajectoire de ce satellite donne la représentation suivante. Chaque position de Thémisto, modélisée par un point bleu, est relevée à intervalle de temps constant. Deux aires balayées $\mathcal{A}_1$ et $\mathcal{A}_2$ sont représentées.



1. Dans quel référentiel considéré galiléen a-t-on obtenu cette trajectoire ?

2. Jupiter, le point jaune, est-elle au centre de l'orbite de Thémisto ?

3. En utilisant la première loi de Kepler, justifier l'allure de la trajectoire.

4. Quelle relation existe-t-il entre les aires A_1 et A_2 ? Justifier.

5. Que peut-on dire des distances parcourues par le satellite dans le cas des aires A_1 et A_2 ? Quelle est la conséquence pour la vitesse du satellite ?

6. Est-ce en accord avec les différentes positions des points ?

13 Orbite de Mars

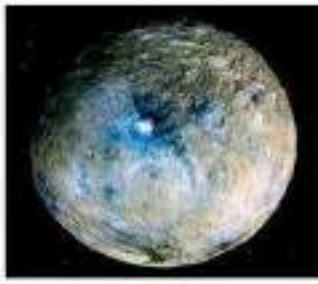
Mars est éloignée du Soleil au maximum de $2{,}46 \times 10^8$ km et au minimum de $2{,}06 \times 10^8$ km.

1. Quelle est la nature de l'orbite de Mars ?

2. Où se place le Soleil par rapport cette orbite ?

3. En quel point la vitesse de Mars est maximale ? minimale ?

14 La planète naine Cérès



Cérès, astre classé dans la catégorie des planètes naines, gravite autour du Soleil dans une ceinture d'astéroïde située entre Mars et Jupiter. Les distances de l'aphélie et du périhélie sont respectivement de $4{,}47 \times 10^8$ km et $3{,}81 \times 10^8$ km.

***Données** : demi-grand axe terre-soleil : $a_T = 1{,}50 \times 10^8$ km ; période de révolution : $T = 365{,}25$ jours.*

1. Que pouvez déduire des distances du périhélie et de l'aphélie sur la nature de la trajectoire ?

2. Représenter, sans soucis d'échelle, l'orbite de Cérès. Indiquer les positions de l'aphélie et du périhélie.

3. Calculer la valeur du demi-grand axe a_C.

4. En utilisant la 3e loi de Kepler, la période de rotation de la Terre et la valeur du demi-grand axe de la Terre, calculer la période de révolution de Cérès.

15 Les satellites de Saturne

Satellite	T (jours)	R (Gm)
Téthys	1,89	0,238
Dioné	2,74	0,377
Rhéa	4,52	0,527
Titan	15,95	1,222
Japet	79,33	3,561

Saturne possède de nombreux satellites, quelques-uns d'entre eux sont donnés avec leur période de révolution et le rayon de l'orbite dans le tableau suivant. On considère l'orbite de ces satellites quasi-circulaire.

***Donnée** : constante gravitationnelle : $G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$*

1. Écrire la troisième loi de Kepler pour le système satellitaire de Saturne.

2. Déterminer l'équation numérique entre la période et le rayon.

3. Encelade est un autre satellite de Saturne de trajectoire quasi circulaire de $0{,}238 \times 10^6$ km de rayon. Déterminer sa période de révolution.

16 La masse de Jupiter

La troisième loi de Kepler pour les satellites de Jupiter s'écrit $\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_J}$ où a est le demi-grand axe de l'orbite du satellite, T la période de révolution d'un satellite et M_J La masse de Jupiter. Ganymède, satellite naturel de Jupiter, possède une période de révolution de 7,15 jours et son demi-grand axe est de 1,07 million de km. Calculer la masse de Jupiter.

2 Cas des mouvements circulaires

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Mouvement des satellites et des planètes dans le cas d'un mouvement circulaire.

- Déterminer les caractéristiques des vecteurs vitesse et accélération du centre de masse d'un système en mouvement circulaire dans un champ de gravitation newtonien.
- Établir et exploiter la troisième loi de Kepler dans le cas du mouvement circulaire.

→ Acquérir les bases : 18 → S'entraîner : 26 27

DONNÉES

- Rayon terrestre : $R_T = 6\,370$ km ; masse de la Terre : $M_T = 6{,}0 \times 10^{24}$ kg ; constante gravitationnelle : $G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$.
- Période de rotation de la Terre sur elle-même : 23 h 56 min 4 s ; masse du Soleil : $M_S = 1{,}99 \times 10^{30}$ kg.

17 Mouvement de la Terre autour du Soleil

On étudie le mouvement de la Terre autour du Soleil dans le cadre de l'approximation des trajectoires circulaires.

Données : *Distance entre les centres de la Terre et du Soleil :* $d_{ST} = 149{,}6 \times 10^9$ m.

1. Dans quel référentiel considéré galiléen doit-on se placer afin d'étudier ce mouvement ?

2. Exprimer vectoriellement la force qui modélise l'action mécanique exercée par le Soleil sur la Terre, puis la représenter sur un schéma, sans souci d'échelle.

3. Montrer que le mouvement de la Terre est uniforme.

4. Exprimer littéralement la vitesse de la Terre autour du Soleil, puis calculer sa valeur.

5. Exprimer puis calculer la période de révolution T_T de la Terre autour du Soleil, en seconde puis en jour.

18 Les satellites GPS

La myriade de satellites GPS (*global positioning system*) est placée sur une orbite en étant animé d'un mouvement circulaire et uniforme à une altitude de $h = 1{,}38 \times 10^4$ km.

1. Dans quel référentiel considéré galiléen le mouvement d'un satellite GPS est-il décrit ?

2. En utilisant la deuxième loi de Newton, montrer que la vitesse de ce type de satellite s'écrit $v = \sqrt{\dfrac{G \cdot M_T}{R_T + h}}$.

3. a. En déduire que la période de révolution du satellite est :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{(R_T + h)^3}{G \cdot M_T}}.$$

b. Calculer la période de révolution.

c. Combien de tour de la Terre réalise ces satellites par jour ?

19 Troisième loi de Kepler pour un mouvement circulaire

Dans un modèle simplifié, les planètes peuvent être représentées par une orbite circulaire. Dans ce cas on considère que la vitesse de la planète a pour relation : $v = \sqrt{\dfrac{G \cdot M_S}{r}}$, avec r la distance entre le centre du Soleil et le centre de la planète, M_S la masse du Soleil et G la constante de gravitationnelle.

1. Indiquer le référentiel considéré galiléen dans lequel sont décrits ces orbites ?

2. Montrer que pour une planète du système solaire dans les conditions données, on obtient $\dfrac{T^2}{r^3} = \dfrac{4\pi^2}{G \cdot M_S}$.

3. En utilisant les données du document 3 de l'activité 2 p. 319, montrer avec un tableau que la relation est vérifiée.

20 Vecteur accélération d'un mouvement circulaire

Le programme Python suivant représente les différentes positions de la Terre et l'accélération subit par celle-ci autour du Soleil dans l'approximation d'un mouvement circulaire.

```
import matplotlib.pyplot as plt
import math as ma
#declaration des différents tableaux
X,t,Y,VX,VY,AX,AY = [],[],[],[],[],[],[]
# période de révolution de l'astre en sonde
T_revolution = 3.15e7
#Rayon de l'orbite circulaire en metre
R = 1.5e11
# période de révolution divisées par 36
for ii in range(35):
    t.append(ii*T_revolution/30)
t.append(T_revolution)
# Calcul des positions
for i in range (35) :
    X.append(R*ma.cos(2*ma.pi*t[i]/T_revolution))
    Y.append(R*ma.sin(2*ma.pi*t[i]/T_revolution))
# calcul des vecteurs vitesses
for i in range (1,34) :
    VX.append((X[i+1]-X[i-1])/(2*T_revolution/30))
    VY.append((Y[i+1]-Y[i-1])/(2*T_revolution/30))
# calcul des vecteurs accélération
for i in range (1,32) :
    print(i)
    AX.append((VX[i+1]-VX[i-1])/(2*T_revolution/30))
    AY.append((VY[i+1]-VY[i-1])/(2*T_revolution/30))
# affichage des positions
plt.axis('equal')
plt.text(0,0 ," Soleil", fontsize = 15,color ='g')
plt.plot(X,Y,"bo")
plt.plot(0,0,"go")
#affichage des vecteurs accélérations
for i in range (31) :
    plt.arrow(X[i+2],Y[i+2],1e13*AX[i],1e13*AY[i]
  ,head_width = 0.5e10,head_length =0.5e10,length_
  includes_head = True)
plt.show()
```

1. Exécuter le programme.

2. Dans quel référentiel considéré galiléen est obtenu le graphe simulé ?

3. Que peut-on dire de l'accélération (direction, sens et valeur) observée sur le graphe simulé ?

4. a. En utilisant la deuxième loi de Newton donner l'expression vectorielle de l'accélération $\vec{a}$.

b. Montrer que l'expression obtenue est compatible avec les résultats observés avec la simulation.

3 Les satellites géostationnaires

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Les satellites géostationnaires.

- Montrer que l'orbite d'un satellite géostationnaire est à une hauteur particulière sur le plan équatorial.

➥ Acquérir les bases : 21 ➥ S'entraîner : 25

DONNÉES

- rayon terrestre : $R_T = 6\,370$ km
- masse de la Terre : $M_T = 6{,}0 \times 10^{24}$ kg
- constante gravitationnelle : $G = 6{,}67 \times 10^{-11}$ m^3 · kg^{-1} · s^{-2}
- période de rotation de la Terre sur elle-même : 23 h 56 min 4 s

21 Satellite géosynchrone et géostationnaire

Un satellite géosynchrone est un satellite possédant une orbite circulaire et une période de révolution de $T = 86\,164$ s.
La période de révolution d'un satellite s'écrit :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{(R_T + h)^3}{G \cdot M_T}}$$ où h est la hauteur par rapport au sol, R_T le rayon de la Terre et M_T la masse de la Terre.

1. Comparer la période de révolution d'un satellite géosynchrone et la période de rotation de la Terre sur elle-même.

2. Calculer la distance par rapport au sol de ce satellite.

3. a. Trois orbites circulaires sont données sur les figures 1, 2 et 3. Montrer l'une des orbites est incompatible avec les lois de la mécanique.

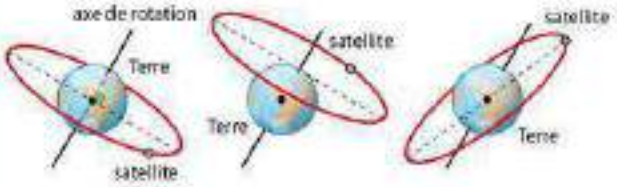


Figure 1 Figure 2 Figure 3

b. D'après les figures ci-dessus, indiquer les situations qui sont susceptibles de représenter une orbite géosynchrone.

4. a. Un satellite géosynchrone est géostationnaire si celui-ci reste à la verticale d'un point sur Terre. Quel est le plan de son orbite ?

b. Quel est le sens de rotation de ce satellite ?

c. Indiquer à quelle figure ci-dessus correspond ce type de satellite.

22 Orbite d'un satellite géostationnaire

La représentation ci-contre montre la trajectoire de deux satellites géosynchrones dont le plan orbital est décalé de 30° et de 63,4° par rapport au plan l'équatorial.
Un satellite géosynchrone possède une orbite circulaire et une période de révolution égale à la période de rotation de la Terre sur elle-même.



1. Dans quel référentiel considéré galiléen sont représentés les trajectoires de ces deux satellites.

2. Quelle forme obtiendrait-on avec un satellite géostationnaire ?

Faire le point avant d'aller plus loin

PRÉPA BAC

Pour vérifier ses connaissances, répondre aux questions suivantes (sans regarder le cours !)

Citer la première loi de Kepler et expliquer ce qu'elle implique sur la nature de l'orbite d'un astre.

Montrer en utilisant la 2e loi de Kepler que la vitesse d'un astre est uniforme sur une orbite circulaire.

Montrer que l'accélération d'un objet spatial en mouvement circulaire autour d'un astre attracteur est radial et centripète.

Sur quel plan doit se placer un satellite géostationnaire ?

Deux satellites possèdent des orbites circulaires autour de la même planète. Le premier est éloigné de $1{,}0 \times 10^3$ km du centre de sa planète avec 15 jours comme période de révolution. Si le second satellite a une période de révolution de 24 jours, quelle la distance qui sépare du centre de la planète ?

Énoncer la troisième loi de Kepler. Peut-elle être utilisée pour décrire l'orbite d'un satellite autour d'une planète ?

Qu'est-ce qu'un satellite géostationnaire ?

Retrouver l'expression de la vitesse $v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}}$ pour un objet spatial en mouvement circulaire et uniforme autour d'un astre attracteur.

Retrouvez ces questions en version numérique Flash PAGE cartes mémos

Exercice résolu — EN AUTONOMIE

23 Étude de l'orbiteur *Exomars Trace Gas Obiter* (ETGO)



La sonde *Exomars Trace Gas Obiter* de l'ESA (agence spatiale européenne), lancée le 14 mars 2016, a fini de se satelliser autour de la planète Mars en avril 2018. Après de multiples manœuvres orbitales, elle s'est placée sur une trajectoire circulaire à une altitude de 400 km de la surface de Mars. Sa mission est d'étudier la présence et l'origine des gaz présents dans l'atmosphère martienne.

1. Dans quel référentiel considéré galiléen est décrit le mouvement ?
2. **Donner** l'expression vectorielle de la force gravitationnelle.
3. **Montrer** en utilisant la deuxième loi de Newton que la vitesse du satellite est constante.
4. **Déterminer** la relation de la vitesse en fonction de M_M, G, R_M et h.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- La nature de l'orbite permet d'en déduire que l'accélération est radiale.
- **L'altitude** est prise par rapport à la surface de l'astre, il faut donc ajouter le rayon de l'astre attracteur.

LES VERBES D'ACTION

- **Donner** : écrire sans démontrer une loi.
- **Montrer** : produire une démonstration, souvent mathématique.
- **Déterminer** : mettre en œuvre une stratégie pour trouver un résultat.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. Le référentiel est le **référentiel marsocentrique** considéré comme galiléen

2. L'expression de la force gravitationnelle appliquée au satellite s'écrit :

$\vec{F} = G\dfrac{M_M \cdot m_S}{(R_M + h)^2}\vec{n}$; où $\vec{n}$ est le vecteur élémentaire lié au repère de Frenet.

3. $m_S \cdot \vec{a} = \vec{F} = G\dfrac{M_M \cdot m_S}{(R_M + h)^2}\vec{n}$

or l'accélération dans le repère de Frenet s'écrit :

$\vec{a} = \dfrac{dv}{dt}\cdot\vec{t} + \dfrac{v^2}{R_M + h}\cdot\vec{n}$ donc la relation précédente devient :

$m_S \cdot \dfrac{dv}{dt}\cdot\vec{t} + m_S \cdot \dfrac{v^2}{R_M + h}\cdot\vec{n} = G\dfrac{M_M \cdot m_S}{(R_M + h)^2}\vec{n}$. Ainsi en effectuant la projection sur $\vec{t}$ on obtient que : $m_S \cdot \dfrac{dv}{dt} = 0$ donc que $\dfrac{dv}{dt} = 0$. On a donc **vitesse constante.**

4. En projetant sur $\vec{n}$, on obtient : $m_S \cdot \dfrac{v^2}{R_M + h} = G\dfrac{M_M \cdot m_S}{(R_M + h)^2}$, en simplifiant les différents termes, on trouve que : $v^2 = G\dfrac{M_M}{R_M + h}$ soit : $\boldsymbol{v = \sqrt{\dfrac{G \cdot M_M}{R_M + h}}}$

QUELQUES CONSEILS

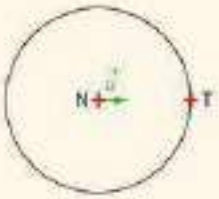
3. Écrire la relation issue de la deuxième loi de Newton et exprimer l'accélération dans le repère de Frenet, puis associer les deux expressions. Il faut être rigoureux dans l'expression des vecteurs unitaires.

EXERCICE SIMILAIRE

24 Triton satellite de Neptune



L'orbite de Triton est circulaire. On appelle N le centre d'inertie de Neptune, T le centre d'inertie de Triton et $\vec{u}$ vecteur unitaire de direction (NT).
Le schéma ci-contre représente l'orbite de Triton autour de Neptune.



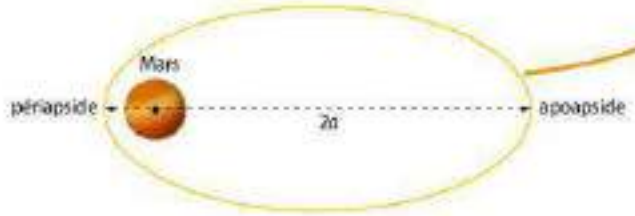
1. Dans quel référentiel considéré galiléen est représentée l'orbite de Triton ?
2. Utiliser la deuxième loi de Kepler pour montrer que la vitesse de triton est constante.
3. Représenter la force gravitationnelle, l'accélération et la vitesse de Triton.
4. La troisième loi de Kepler s'écrit pour le système satellitaire de Neptune $\dfrac{T^2}{R_N^3} = \dfrac{4\pi^2}{G \cdot M_N}$
   a. Calculer la valeur de la période de révolution de Triton.
   b. En déduire l'expression de la vitesse. La calculer.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Exercice résolu EN AUTONOMIE

25 Étude de l'orbiteur *Mars Orbiter Mission* (MOM)

L'Inde est devenue, le 24 septembre 2014, la quatrième nation à placer dans l'orbite de Mars un satellite d'observation de la planète. Ce satellite possède une orbite fortement elliptique, distant de la surface de la planète au périapside (P) de $h_1 = 422$ km et à l'apoapside (A) de $h_2 = 76\,994$ km. La trajectoire du satellite est représentée sur la figure suivante où a est le demi-grand axe de l'ellipse.



Données : *Rayon de Mars : $R_M = 3\,390$ km ; rayon de l'orbite circulaire de Phobos : 9 377 km ; période de révolution de Phobos : 7 h 39 min.*

1. Dans quel référentiel est décrite l'orbite de MOM ?
2. En utilisant la première loi de Kepler, **justifier** la position du centre de Mars.
3. Écrire l'expression du demi-grand axe en fonction des différentes altitudes et le rayon de Mars. **En déduire** sa valeur.
4. La Troisième loi de Kepler permet d'écrire que $\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_M}$ où M_M et G sont respectivement la masse de Mars et la constante gravitationnelle.

En utilisant les données de Phobos, satellite naturel de Mars, **déterminer** la période de révolution de MOM.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- Il faut repérer les positions sur le schéma du périapside, de l'apoapside ainsi que les différentes longueurs : a, h_1, h_2 et R_M.

LES VERBES D'ACTION

- **Justifier** : donner une explication au choix effectué à l'aide de l'énoncé.
- **Déterminer** : mettre en œuvre une stratégie pour trouver un résultat.
- **En déduire** : utiliser le résultat précédent pour répondre.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. Le référentiel est le **référentiel marsocentrique** considéré galiléen.
2. D'après la première loi de Kepler, le centre de Mars est placé à **l'un des foyers de la trajectoire elliptique**.
3. En se servant du schéma, on voit que : $2a = h_1 + 2 \cdot R_M + h_2$;

donc : $a = \frac{h_1 + 2 \cdot R_M + h_2}{2} = \frac{422 + 2 \times 3\,390 + 76\,994}{2} = \mathbf{4{,}21 \times 10^4\ km}$

4. On obtient $\frac{T^2}{a^3} = \frac{T_P^2}{R_P^3}$ donc $T^2 = \frac{T_P^2}{R_P^3} \cdot a^3$

soit $T = T_P \sqrt{\frac{a^3}{R_P^3}} = 459 \times \sqrt{\frac{(4{,}21 \times 10^7)^3}{(9\,377 \times 10^3)^3}} = 4{,}37 \times 10^3$ min soit près de 73 heures.

QUELQUES CONSEILS

3. Placer sur le schéma les différentes longueurs permet de voir plus facilement la relation avec 2a.
4. La masse de Mars et de la constante gravitationnelle n'étant pas données, il faut utiliser les données de Phobos pour trouver la période de révolution du satellite.

EXERCICE SIMILAIRE

26 La comète Hale-Bopp

Hale-Bopp est une comète de type périodique. Elle est passée pour la dernière fois près de son périhélie le 1er avril 1997. La valeur de son demi-grand axe est de 186 U.A et a été modifiée récemment par la perturbation engendrée par Jupiter.

Données : *masse du Soleil : $M_S = 2{,}0 \times 10^{30}$ kg ; constante gravitationnelle : $G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$; 1 U.A = 150 millions de km.*

1. Dans quel référentiel est décrit le mouvement de la comète Hale-Bopp ?
2. À quoi est dû la perturbation engendrée par Jupiter ?
3. D'après la troisième loi de Kepler, on a que $\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_S}$ où M_S et G sont respectivement la masse du Soleil et la constante gravitationnelle.

Calculer la période de révolution de Hale-Bopp.



S'entraîner pour maîtriser

SAVOIR RÉDIGER

27 Proposer une correction de la solution proposée par un élève à l'énoncé.

Énoncé

L'ISS est une station spatiale internationale de masse m, en orbite circulaire autour de la Terre à l'altitude de $h = 480$ km. Elle est le lieu d'expériences et d'observation de la Terre.

Données : la masse de la Terre : $M = 5{,}98 \times 10^{24}$ kg ; le rayon de la Terre : $R = 6{,}37 \times 10^{3}$ km ; constante gravitationnelle $G = 6{,}67 \times 10^{-11}$ $m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$.

1. Dans quel référentiel considéré galiléen est décrit le mouvement ?

2. Donner l'expression de la distance r entre le centre de la Terre et le centre d'inertie de la station. Calculer sa valeur.

3. Donner l'expression vectorielle de la force de gravitation exercée par la Terre sur la station.

4. Donner l'expression vectorielle de l'accélération dans le repère de Frenet de la station

5. En utilisant la deuxième loi de Newton en déduire l'expression v de la vitesse puis la calculer.

6. Calculer la période de révolution de la station.

Solution proposée par un élève

1. Le référentiel est le centre de la Terre

Votre réponse est incomplète.

2. La distance est $470 + 6{,}37 \times 10^3 = 6\,840$ km

Écrire l'expression littérale avant de faire l'application numérique. Le nombre de chiffres significatifs est incorrect

3. L'expression de la force est : $F = -G\dfrac{m \cdot M}{r^2}\vec{u}$

Il manque une flèche sur la force. Quel est ce vecteur unitaire ? Faire un schéma, ça aide…

4. Le vecteur accélération pour un mouvement circulaire s'écrit : $\vec{a} = \dfrac{v^2}{r}\vec{n}$

Schéma ?

5. D'après la deuxième loi Newton, on a : $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$

$\dfrac{v^2}{r}\vec{n} = -G\dfrac{m \cdot M}{r^2}\vec{u}$ donc $v^2 = -G\dfrac{M}{r}$ et $v = \sqrt{\dfrac{G \cdot M}{r}}$

$v = \sqrt{\dfrac{6{,}67 \times 10^{-11} \times 5{,}98 \times 10^{24}}{6\,840}} = 2{,}41 \times 10^{5}\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Démonstration peu rigoureuse… Mauvaise conversion.

6. La période $v = \dfrac{2\pi r}{T}$ soit

$T = \dfrac{2\pi r}{v} = \dfrac{2\pi \times 6\,840 \times 10^3}{2{,}41 \times 10^5} = 178$ s

Être critique par rapport à la valeur trouvée.

28 Mouvement de la Terre autour du Soleil

Les différents points notés M_i représentent les différentes positions de la Terre à différentes dates successives. S est le centre du Soleil. Il s'écoule entre chaque point successif $\Delta t = 30{,}4$ jours et la distance Terre-Soleil est de 150×10^6 km.



1. Dans quel référentiel considéré galiléen observe-t-on une telle trajectoire ?

2. Que peut-on dire du mouvement de la Terre autour du Soleil ?

3. Reproduire la figure ci-dessus avec par exemple un papier calque.

4. Déterminer et tracer les vecteurs vitesses $\vec{v}_{M_0}$ et $\vec{v}_{M_4}$ en utilisant une échelle adaptée.

5. a. Déterminer et tracer, en utilisant une échelle adaptée, le vecteur accélération en M_5 tel que $\vec{a}_{M_5} = \dfrac{\vec{v}_{M_6} - \vec{v}_{M_4}}{2 \times \Delta t}$

b. Que peut-on déduire quant à la direction et le sens du vecteur accélération en ce point ?

6. a. Calculer le rapport $\dfrac{v^2}{a}$.

b. Quelle valeur correspond à ce rapport ?

c. En déduire une relation vectorielle de l'accélération en fonction de v, de la grandeur trouvée précédemment et du vecteur unitaire $\vec{u}_n$ unitaire, radial et centripète.

29 Accélération de Mercure

TABLEUR-GRAPHEUR PYTHON

Le programme Python simule les positions de Mercure à intervalles de temps constant sur une orbite elliptique. Pour ces différentes positions le vecteur accélération est représenté.

```
import matplotlib.pyplot as plt
import math as m
import scipy.optimize as op
#declaration des listes de données
t,M,u,theta,R,X,Y,VX,VY,AX,AY = [],[],[],
  [],[],[],[],[],[],[],[],[]
# Données d'astronomie
T_revolution = 0.240#période de révolution en année
e = 0.206 # excentricité
a = 5.8e12 # demi grand axe en mètre (m)
```


Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

```
N = 40 # Nombre d'intervalles de temps
# résolution des équations de Kepler
for i in range(N+5):
    t.append(i*T_revolution /N)
    M.append(2*m.pi/T_revolution *t[i])
    u.append(float(op.fsolve (lambda x:x-e*m.sin(x)
    -M[i],0) ))
# Calculs des coordonnées
    theta.append(2*m.atan((m.sqrt((1+e)/(1-e))
    *m.tan(u[i]/2))))
    R.append(a*(1-e**2)/(1+e*m.cos(theta[i])))
    X.append(R[i]*m.cos(theta[i]))
    Y.append(R[i]*m.sin(theta[i]))
# calcul du vecteurs vitesses
for i in range (1,N+4) :
    VX.append((X[i+1]-X[i-1])/(2*T_revolution/N))
    VY.append((Y[i+1]-Y[i-1])/(2*T_revolution/N))
# calcul des vecteurs accélérations
for i in range (1,N+2) :
    AX.append((VX[i+1]-VX[i-1])/(2*T_revolution/N))
    AY.append((VY[i+1]-VY[i-1])/(2*T_revolution/N))
#Affichage
plt.figure('Mouvement de Mercure')
plt.axis('equal')
plt.text(0,0 ," Soleil", fontsize = 15,color ='g')
plt.plot(X,Y,"bo")
plt.plot(0,0,"go")
#Affichage vecteurs accélérations
for i in range (N+1) :
    plt.arrow(X[i+2],Y[i+2],5e-4*AX[i],5e-4*AY[i],
    head_width = 1e11,head_length =1e11,length_
    includes_head = True)
plt.show()
```

1. Exécuter le programme.

2. Dans quel référentiel considéré galiléen est décrit l'orbite de Mercure ?

3. En observant le graphe obtenu, décrire les variations de vitesse de Mercure.

4. Montrer que les vecteurs accélérations représentés sur le graphe simulé sont compatibles avec la deuxième loi de Newton.

5. Vérifier que les variations de vitesse sont compatibles avec la deuxième loi de Kepler.

6. En changeant les données de Mercure dans le programme par les données d'une autre planète (voir **doc. 3** de l'activité 2 page 319), montrer que les propriétés sur les vecteurs restent identiques.

30 What is this planet ?

A satellite (S) orbits a planet (P) in a uniform circular motion.

Data : *(S)'s orbital radius :* $r_S = 6.7 \times 10^5$ *km. (S)'s orbital period :* $T_S = 3$ *d 13 h 14 min.*

Planète	Masse (en kg)
Vénus	$4{,}87 \times 10^{24}$
Terre	$5{,}98 \times 10^{24}$
Mars	$6{,}42 \times 10^{23}$
Jupiter	$1{,}90 \times 10^{27}$

Mass of some planets

1. What happens to Kepler's third law in the case of this satellite (S) moving in uniform circular motion ?

2. Calculate the orbital period of the satellite (S) in seconds.

3. a. Express the mass M_p of the planet (P), then calculate it.
b. Deduce the planet's identity from the above result.

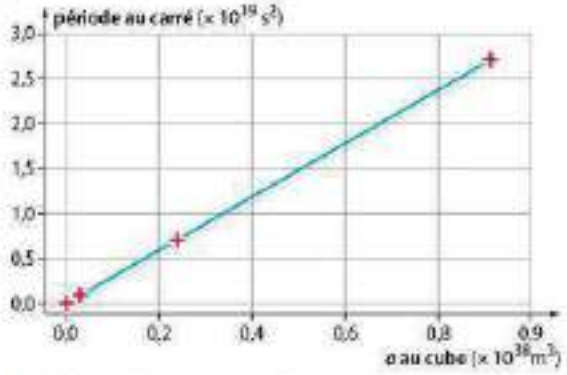
31 L'astéroïde Ida et sa lune Dactyle

L'astéroïde Ida est situé dans la ceinture d'astéroïde entre Mars et Jupiter, il a été découvert en 1884 par l'astronome autrichien Johann Palisa. La mission Galileo, sonde spatiale, passe à proximité et photographie le satellite d'Ida, Dactyle. D'après les photos, quelques relevés sont effectués : le temps de révolution est de 1,54 jour et la valeur de son demi-grand axe est de 108 km.



Données : *périhélie d'Ida* $= 4{,}08 \times 10^8$ *km ;*
aphélie d'Ida $= 4{,}48 \times 10^8$ *km ;*
constante gravitationnelle $G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$

Le graphe suivant représente $T^2 = f(a^3)$ de l'ensemble des planètes du système solaire, chaque point de la droite correspond à une planète.

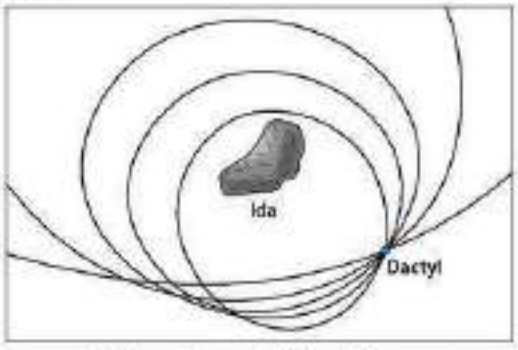


1. En utilisant le graphique, déterminer l'équation $T^2 = k \cdot a^3$.

2. Calculer la valeur du demi-grand axe de l'orbite d'Ida.

3. En déduire la période de révolution d'Ida autour du Soleil.

4. Malgré la mesure du demi-grand axe de Dactyle autour d'Ida, l'orbite de celle-ci n'est pas connue avec précision. La simulation représentée ci-dessous montre les différentes possibilités.



a. Dans quel référentiel considéré galiléen sont représentées ces trajectoires ?
b. Comment appelle-t-on ce type d'orbite ?
c. Où est placée Ida dans ce type de trajectoire ? Justifier.
d. En utilisant la relation de la 3e loi de Kepler, calculer la masse d'Ida.

32 L'exoplanète Gliese 581c

L'exoplanète Gliese 581c a été découverte le 4 avril 2007 par une équipe d'astronomes européens. Cette lointaine exoplanète gravite autour d'une naine rouge Gliese 581 dont la masse est évaluée à 31 % de celle du Soleil. Cette découverte a permis aussi de déterminer les valeurs des caractéristiques orbitales.

Demi-grand axe : $7{,}2993 \times 10^{-2}$ UA avec une incertitude-type $2{,}2 \times 10^{-5}$ UA, la période de révolution est de 12,9191 jours avec une incertitude-type $5{,}8 \times 10^{-3}$ jour.

Données : *La troisième loi de Kepler* $\dfrac{T^2}{a^3} = \dfrac{4\pi^2}{G \cdot M_{étoile}}$

Constante gravitationnelle :

$$G = \left(6{,}67408 \pm 0{,}00031\right) \times 10^{-11}\,m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$$

L'incertitude-type de la masse se calcule par la relation suivante :

$$u(M) = M \times \sqrt{\left(\frac{u(G)}{G}\right)^2 + \left(3 \times \frac{u(a)}{a}\right)^2 + \left(2 \times \frac{u(T)}{T}\right)^2}$$

Unité astronomique : 1 UA = $1{,}50 \times 10^{11}$ m

Masse du Soleil : $1{,}989 \times 10^{30}$ kg

1. Dans quel référentiel considéré galiléen les caractéristiques orbitales sont données ?

2. Calculer la masse de l'étoile Gliese 581.

3. Calculer l'incertitude-type de la masse de l'étoile, puis exprimer l'intervalle de confiance de la masse.

4. Comparer le résultat obtenu, en utilisant la relation suivante $\dfrac{|M_{mes} - M_{ref}|}{u(M)}$ tel que M_{mes} est la masse issue de la mesure, M_{ref} la mesure de référence donnée dans l'énoncé et $u(M)$ l'incertitude-type. Conclure.

33 La sonde Rosetta et la comète Tchouri



La sonde spatiale Rosetta accompagnée de son petit robot atterrisseur Philae ont été envoyé pour étudier la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko surnommée « Tchouri ». Rosetta devient le satellite de la comète durant plusieurs mois en restant dans le sillage de son champ de gravitation. Elle réussit à rester plusieurs jours sur une orbite circulaire à une altitude de 10 km de la surface de la comète. Pour simplifier l'étude, on considère la comète sphérique avec un rayon de 2,5 km.

Données : *masse de la comète :* $M_c = 1{,}0 \times 10^{13}$ kg ;
masse du satellite $m_s = 3{,}0$ tonnes ;
constante gravitationnelle : $G = 6{,}67408 \times 10^{-11}\,m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$;
troisième loi de Kepler : $\dfrac{T^2}{R^3} = \dfrac{4\pi^2}{G \cdot M_c}$.

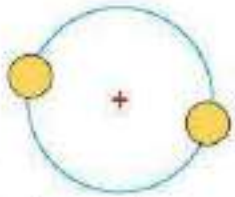
1. Dans quel référentiel considéré galiléen est décrite la trajectoire de Rosetta ?

2. Calculer la période de révolution de Rosetta autour de la comète.

3. Écrire l'expression vectorielle de la force de gravitation appliquée à la sonde Rosetta.

4. En déduire la relation vectorielle du champ de gravitation $\vec{g}$.

34 Système d'étoiles binaires



Deux étoiles ont la même masse. On considère qu'ils sont sur une même orbite circulaire de rayon r mais diamétralement opposés comme le montre le schéma ci-contre.

1. Schématiser le système des deux étoiles et représenter sans souci d'échelle la force d'interaction gravitationnelle exercée par l'une des deux étoiles sur l'autre et donner l'expression de sa valeur en fonction de G, m et r.

2. Le référentiel dans lequel les étoiles sont en mouvement circulaire et uniforme est considéré galiléen. On considère le centre de la trajectoire fixe dans ce référentiel.

a. Montrer que la vitesse v des étoiles peut s'écrire :

$$v = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{G \cdot m}{r}}.$$

b. En déduire que le rayon de l'orbite est lié à la période de révolution des étoiles par la relation :

$$r^3 = \frac{G \cdot m}{16 \cdot \pi^2} \cdot T^2.$$

À L'ORAL

35 Satellisation en orbite géostationnaire

On considère l'animation suivante illustrant la mise en orbite d'un satellite géostationnaire.



Les mots-clés à utiliser

- orbites elliptique et circulaire,
- les lois de Kepler,
- la force gravitationnelle,
- le vecteur vitesse et le vecteur accélération,
- poussée moteur,
- orbite géostationnaire,
- orbite de transition.

Élaborer un exposé de quelques minutes expliquant la méthode utilisée pour placer en orbite géostationnaire. Il est attendu la maîtrise du langage scientifique.

36 RETOUR SUR LA PAGE D'OUVERTURE

La planète Terre a une masse de $6{,}0 \times 10^{24}$ kg et possède un seul satellite naturel, la Lune. Sachant que la période de révolution de la Lune autour du Soleil est de 27 jours, **préparer un exposé oral explicant comment déterminer le rayon de son orbite autour de la Terre et sa vitesse et de son accélération ?**



PRÉPA BAC

Développer ses compétences

37 Découverte d'une exoplanète habitable

RÉSOLUTION DE PROBLÈME

50 min

ANA (RAI) Proposer une stratégie de résolution APP Rechercher et organiser l'information

En 2017 un système de quatre exoplanètes a été mis en évidence autour de l'étoile de Luyten GJ23.

DOC 1 L'étoile de Luyten

L'étoile de Luyten (GJ 273) est une étoile de type naine rouge situé à 12,4 années de lumière de la Terre. Elle est de dimension modeste par rapport à notre Soleil, sa masse représente le quart de la masse du Soleil et un dixième de son rayon.

La température de surface de l'étoile de Luyten est de 3 150 kelvins.

DOC 2 Les caractéristiques des exoplanètes

Nom de l'exoplanète	Masse (multiple de masse de Terre)	Demi-grand axe a (UA)	Période orbitale (jours)	Excentricité
GJ 273 b	2,89 ± 0,26	0,09110	18,650	0,10 ± 0,08
GJ 273 c	1,18 ± 0,16	0,036467	4,7234	0,12
GJ 273 d	10,8 ± 3,9	0,712	413,9	0,17
GJ 273 e	9,3 ± 4,3	0,849	542	0,03

Les rayons des exoplanètes ne sont pas connus.

DOC 3 Position des trois premières planètes du système solaire



DOC 4 Expression de la troisième loi de Kepler

$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M} = k$ avec T la période de révolution, a le demi-grand axe, G la constante gravitationnelle et M la masse de l'astre attracteur.

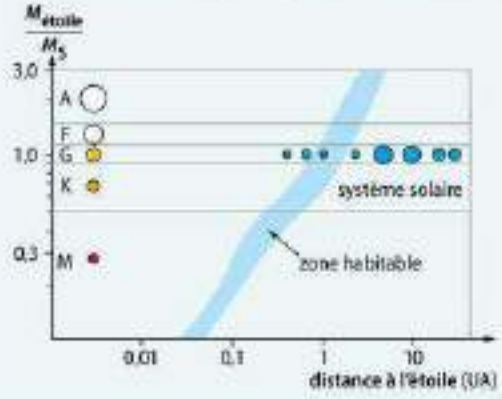
DONNÉES

- Plus la valeur de l'excentricité est proche de 1 plus la trajectoire est elliptique et les foyers éloignés du centre de l'orbite. Plus la valeur de e est proche de 0, plus la trajectoire est circulaire.
- Masse du Soleil : $M_s = 2{,}0 \times 10^{30}$ kg.
- 1 UA = 150 millions de km correspond à la distance moyenne entre la Terre et le Soleil.
- $G = 6{,}67 \times 10^{-11}$ m^3 · kg^{-1} · s^{-2}.

DOC 5 Zone d'habitabilité dans un système stellaire

La zone en bleue délimite la température de la planète acceptable pour que la vie puisse s'y installer.

La température de la planète dépend de la distance et de la nature de l'étoile qui est plus ou moins chaude.



ANALYSE

1. Reproduire la représentation du document 3 et superposer le même graphique pour le système d'exoplanètes.

2. a. Justifier qu'une planète ayant une orbite quasi-circulaire est moins soumise aux variations de luminosité et donc de température.
b. Quelles sont les exoplanètes dont l'orbite est quasi-circulaire ?

3. Montrer que la 3e loi de Kepler est vérifiée pour les exoplanètes du système de l'étoile GJ273.

4. a. En déduire la valeur de la masse de l'étoile de Luyten.
b. Comparer à celle donnée dans les documents.
c. Quelle donnée sur les exoplanètes manque-t-il afin de connaître le champ de gravitation à leur surface ?

SYNTHÈSE

En vous aidant des documents, des questions précédentes et de vos connaissances, justifier que certaines de ces exoplanètes sont susceptibles d'être habitables ou non habitables.

Indiquer les données qui vous manquent pour conclure.

Toute prise d'initiatives et de présentation de la démarche suivie sera valorisée même s'il elle n'a pas abouti.

38 Estimation de la masse d'un trou noir

RÉSOLUTION DE PROBLÈME

50 min

ANA/RAI Proposer une stratégie de résolution APP Rechercher et organiser l'information

Certaines étoiles très proches du centre galactique sont suivies depuis plusieurs années par une équipe internationale de chercheurs.

DOC 1 La traque du trou noir en infrarouge

Les premières mesures ont révélé que ces étoiles décrivent des trajectoires elliptiques, ce qui implique effectivement qu'un objet sombre de plusieurs millions de fois la masse du Soleil doit résider dans un volume très petit au centre de la galaxie. Il s'agissait là d'un premier résultat important.

C'est dans la période du printemps et de l'été 2002 que les choses ont pleinement évolué.

La chance a voulu que, d'une part, l'une des étoiles surveillées – dénommée S2 – est passée au plus proche du centre de masse durant cette période et que, d'autre part, cette approche s'est faite à une distance remarquablement petite : seulement 17 heures-lumière.

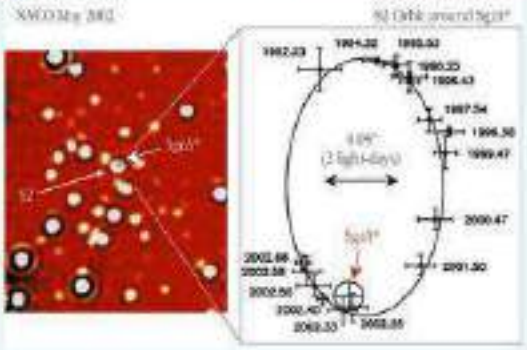
Le fait que la trajectoire soit restée purement képlérienne a ainsi permis d'éliminer définitivement toute possibilité que la masse de quelques millions de masses solaires soit sous forme d'un amas dense stellaire sombre. En effet la taille de toutes ces structures est bien plus grande que les 17 heures-lumière de la distance d'approche. Seule reste la possibilité du trou noir très massif.

DOC 2 Expression de la troisième loi de Kepler

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M}$$

Avec T la période de révolution, a le demi-grand axe, G la constante gravitationnelle et M la masse de l'astre attracteur.

DOC 3 Orbite de l'étoile S2



Light-days est la distance en jour-lumière, elle correspond à la distance parcourue par la lumière en une journée.

DOC 4 Quelques notions

- Une année de lumière est la distance parcourue par la lumière en une année. Les sous-multiples sont le jour-lumière et l'heure-lumière.
- Lorsque qu'un astre est au périapsie, position la plus proche de l'astre attracteur, alors la distance $r_{péri}$ avec $r_{péri} = a(1-e)$ où a est le demi-grand axe et e l'excentricité.
- Plus la valeur de e est proche de 1 plus la trajectoire est elliptique et les foyers éloignés du centre de l'orbite. Plus la valeur de e est proche de 0, plus la trajectoire est circulaire.
- La vitesse orbitale d'un astre le long d'une orbite elliptique s'écrit : $v = \sqrt{G \cdot M\left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right)}$ où G est la constante gravitationnelle, M la masse de l'astre attracteur, a est le demi-grand axe de l'ellipse et r la distance entre le centre de gravité de l'astre attracteur et le centre de l'astre en mouvement.
- En prenant une limite à 1 % d'erreur entre la mécanique newtonienne et la mécanique relativiste, la limite entre vitesse non relativiste et relativiste se situe à un dixième (10 %) de la vitesse de la lumière ($0{,}1 \cdot c$).
- Masse du Soleil : $M_S = 2{,}0 \times 10^{30}$ kg.
- Constante de gravitation : $G = 6{,}67 \times 10^{-11}$ m$^3 \cdot$ kg$^{-1} \cdot$ s^{-2}
- Vitesse de la lumière : $c = 3{,}00 \times 10^8$ m $\cdot$ s^{-1}

ANALYSE

1. Quels arguments laissent penser que le centre de notre galaxie est un trou noir ?
2. a. Que signifie la phrase en italique dans le document 1 quant à la nature de la trajectoire ?
   b. Quelle est la position du trou noir par rapport à l'orbite de cette étoile ?
3. a. Estimer la durée de révolution de l'étoile S2 autour du trou noir.
   b. Évaluer la valeur du demi-grand axe de l'ellipse qui correspond à l'orbite de l'étoile.
4. a. Calculer la vitesse lorsque l'étoile est au plus proche du trou noir.
   b. Comparer cette vitesse à celle de la lumière.

SYNTHÈSE

Évaluer la masse de ce trou noir. Discuter l'importance de la valeur et la validité de celle-ci.

Toute prise d'initiatives et de présentation de la démarche suivie sera valorisée même s'il elle n'a pas abouti.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

39 le LEM et la capsule Apollo

RÉSOLUTION DE PROBLÈME

30 min

ANA/RAI Proposer une stratégie de résolution

Apollo XI est la première mission à être parvenue à déposer des hommes à la surface de la Lune. Une des phases de cette mission est la mise en orbite de la capsule Apollo à une altitude h égale à 110 km. Son mouvement est circulaire et uniforme autour du centre de la Lune. Le module lunaire (LEM) est alors envoyé sur la Lune, avec deux astronautes à son bord. Le troisième astronaute reste à bord de la capsule Apollo. Dans cette étude, on néglige la rotation de la Lune sur elle-même.



QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Dans quel référentiel considéré galiléen est décrit le mouvement de la capsule ?
2. Donner l'expression de la valeur du vecteur accélération de la capsule sur son orbite en fonction de G, M_L, h, R_L.
3. Montrer que la valeur v de la vitesse de la capsule est donnée par :

$$v = \sqrt{\frac{G \cdot M_L}{R_L + h}}.$$

4. Vérifier que la durée entre deux passages successifs de la capsule Apollo à la verticale du module lunaire posé sur la Lune vaut environ 2 h.

DONNÉES

- rayon lunaire : $R_L = 1\,737$ km, masse de la Lune : $M_L = 7{,}34 \times 10^{22}$ kg ;
- constante de gravitation : $G = 6{,}67 \times 10^{-11}$ m$^3 \cdot$ kg$^{-1} \cdot$ s^{-2}

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

Après avoir expliqué pourquoi la communication entre les astronautes sur la Lune et leur collègue resté dans la capsule ne peut se faire que sur la partie de l'orbite représentée en gras, élaborer une stratégie afin de déterminer la durée possible de communication à chaque révolution de la capsule ?

DOC 2 Orbite du LEM

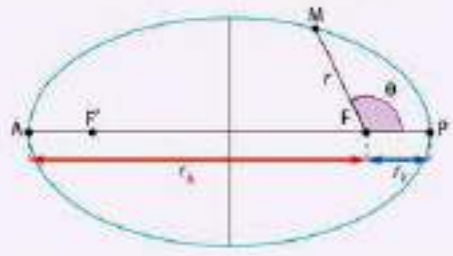
Le schéma ci-contre représente l'orbite de la capsule Apollo autour de la Lune. Les échelles ne sont pas respectées.



VERS LE SUP'

40 Trajectoire elliptique et orbite de transfert

Soit F le foyer d'une ellipse et M un point quelconque de cette ellipse. On peut déterminer la distance r = FM à l'aide de la relation suivante : $r = \dfrac{p}{1 + e \cdot \cos\theta}$ avec p, paramètre de l'ellipse (en m) et e, excentricité de l'ellipse (sans unité). θ est l'angle orienté défini sur le schéma suivant. Le point P est le *périgée* et le point A est l'*apogée*.



1. a. Déterminer l'expression de la distance r_P = FP en fonction de p et de e.
b. Faire de même pour la distance r_A = FA.

2. Pour quelles valeurs de θ a-t-on $r = p$?

On considère un satellite (S) placé sur une orbite circulaire basse autour de la Terre (T). On souhaite le faire passer sur une orbite circulaire définitive. Ce transit s'opère sur une orbite de transfert qui est elliptique. Son périgée P est sur l'orbite circulaire basse et son apogée A est sur l'orbite circulaire définitive.



***Données :** rayon de l'orbite circulaire basse : $r_1 = 200$ km ; rayon de l'orbite circulaire définitive : $r_2 = 800$ km.*

3. a. Une fois sur son orbite circulaire définitive, la période de révolution T_2 de ce satellite sera-t-elle plus grande ou moins grande que sa période de révolution T_1 lorsqu'il était sur son orbite circulaire basse ? Justifier.
b. Calculer alors le rapport.

4. a. Que représente le centre de la Terre pour l'ellipse correspondant à l'orbite de transfert ?
b. En déduire la relation entre r_p et r_1, puis entre r_A et r_2.

5. a. Exprimer le paramètre p et l'excentricité e de l'orbite de transfert en fonction de r_1 et r_2.
b. Calculer les valeurs de p et e.

6. a. Exprimer le demi-grand axe a de l'orbite de transfert en fonction de r_1 et r_2.
b. Calculer sa valeur.

Étude d'un système d'exoplanètes

Contexte

L'objectif est d'étudier un système d'exoplanète et d'utiliser la troisième loi de Kepler.

Documents mis à disposition

Le tableau suivant indique les caractéristiques d'exoplanètes agissant autour de l'étoile **Tau Ceti**.

Planète	Masse (M_T = masse de la Terre)	Demi-grand axe (UA)	Période orbitale (jours)
Tau Ceti b	$2{,}00 \pm 0{,}79\ M_T$	$0{,}105 \pm 0{,}006$	$13{,}965 \pm 0{,}02$
Tau Ceti c	$3{,}11 \pm 1{,}40\ M_T$	$0{,}195 \pm 0{,}01$	$35{,}362 \pm 0{,}1$
Tau Ceti d	$3{,}50 \pm 1{,}59\ M_T$	$0{,}374 \pm 0{,}02$	$94{,}11 \pm 0{,}7$
Tau Ceti e	$4{,}29 \pm 2{,}00\ M_T$	$0{,}552 \pm 0{,}02$	$168{,}12 \pm 2{,}0$
Tau Ceti f	$6{,}67 \pm 3{,}50\ M_T$	$1{,}35 \pm 0{,}1$	642 ± 30
Tau Ceti g	$1{,}80 \pm 0{,}3\ M_T$		$20 \pm 0{,}10$
Tau Ceti h	$1{,}80 \pm 0{,}3\ M_T$	$0{,}243 \pm 0{,}003$	$49{,}41 \pm 0{,}80$

L'incertitude type de la constante k se détermine par la relation (FICHE MÉTHODE ➥ p. 538)

$$u(k) = k \cdot \sqrt{\left(2 \times \frac{u(T)}{T}\right)^2 + \left(3 \times \frac{u(a)}{a}\right)^2}$$

La troisième loi Kepler s'écrit $\frac{T^2}{a^3} = k$ où k est une constante telle que $k = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_{étoile}}$, avec G la constante gravitationnelle $G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$ et $M_{étoile}$ la masse de Tau Ceti.

La régression linéaire est une méthode statistique permettant de trouver l'équation d'une fonction affine à partir d'un nuage de points issu de mesures. Le modèle est validé si le coefficient de corrélation, proche de 1 ou −1, 0,999... est une valeur convenable.

Programme utilisé pour montrer la troisième loi de Kepler du système solaire

```
import matplotlib.pyplot as plt
import scipy.stats as stat
# listes des demi-grands axes a en U.A et périodes des
  planètes en années
LIST_a=[0.387,0.723,1.0,1.52,5.20,9.51,19.2,30.0]
LIST_T=[0.240,0.615,1.0,1.88,11.9,29.4,84.0,165.0]
LIST_P=['Mercure','Venus','Terre','Mars',
  'Jupiter','Saturne','Uranus','Neptune']
# Les valeurs dans listes a au cube et T au carré
for i in range(0, len(LIST_a)):
      LIST_a[i]=(LIST_a[i]*150e9)**3
      LIST_T[i]=(LIST_T[i]*365*24*3600)**2
# régression linéaire afin de vérifier la troisième loi de
  Kepler
regression = stat.linregress(LIST_a,LIST_T)
pente =regression[0]
print('pente --> '+str(pente))
ordorigine =regression[1]
print('ordonnee à l origine --> '+str(ordorigine))
coeffcorel=regression[2]
print('coefficient de corrélation --> '+str(coeffcorel))
#affichage point et droite de régression
a_3_max=LIST_a[len(LIST_a)-1]
T_2_max =pente *a_3_max + ordorigine
plt.grid(True)
plt.xlabel(' a au cube (m3)')
plt.ylabel('periode au carré (s2)')
plt.scatter(LIST_a,LIST_T,s=100, c='red',marker='+')
for i in range (0,len(LIST_a)):
      plt.text(LIST_a[i],LIST_T[i], LIST_P[i],fontsize =8)
plt.plot ([0,a_3_max],[ordorigine,T_2_max],c='blue')
plt.show()
```

Travail à effectuer

1. (ANAL) (RÉA) **Proposition de protocole expérimental** *(20 min conseillées)*

- Modifier le programme afin de tracer le graphe $T^2 = f(a^3)$ pour le système planétaire de l'étoile Tau Ceti.

Être en mesure de présenter le protocole

Matériel mis à disposition

- Un ordinateur avec un éditeur Python.
- Le programme 3e Loi de Kepler pour le système solaire.

2. (RÉA) **Mise en œuvre du protocole expérimental proposé** *(20 min conseillées)*

- Mettre en œuvre le protocole, tracer le graphe $T^2 = f(a^3)$ et trouver la valeur de k.

Être en mesure d'utiliser le langage informatique

3. (VAL) **Exploitation du résultat obtenu** *(20 min conseillées)*

- Estimer l'incertitude-type pour une valeur de la constante k.
- Déterminer la masse de l'étoile Tau Ceti. Comparer à la valeur indiquée dans les documents.
- Déterminer la valeur du demi-grand axe de Tau Ceti g.

Fermer le logiciel utilisé sans sauvegarder.

PISTE POUR LE GRAND ORAL PRÉPA BAC

Pour se préparer à l'Oral
➥ Livret LES CLÉS DU BAC
(en début de manuel)

UNE QUESTION

Existe-il des planètes habitables dans l'univers?

Enjeu de la question

Depuis 1990 et la découverte des premières exoplanètes la traque aux exoplanètes habitables se poursuit à l'aide de télescopes de plus en plus performants. Il est important de préciser les conditions à réunir pour qu'une planète puisse être considérée comme habitable.

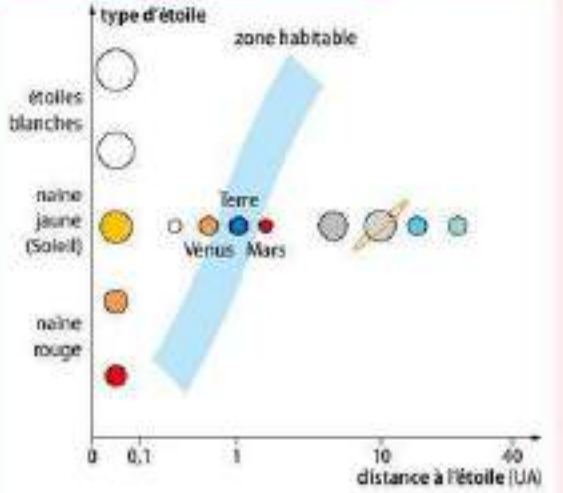
Proposition de plan de présentation

1. Définition du concept de l'habitabilité.
2. La position de la planète par rapport à son étoile.
3. Le type d'orbite de la planète et conséquence sur l'habitabilité.
4. La position du système étoile -planètes dans la galaxie.
5. La taille de la planète et son champ de gravitation.
6. Conclusion : Critique et limite du concept.

Les mots-clés

orbite ▸ loi de Kepler ▸ rayonnement électromagnétique ▸ champ de gravitation

Exemple de support de présentation



Zone d'habitabilité dans le système solaire

QUESTIONS D'APPROFONDISSEMENT POSSIBLES



UN EXEMPLE DE PROJET PROFESSIONNEL

Les métiers relatifs à l'astrophysique ou l'astronomie sont liés à la recherche fondamentale universitaire. Les postes sont peu nombreux et très sélectifs.

Après le bac : *il faut compter pas moins de 11 ans d'études, 5 ans pour obtenir un master de physique théorique ou éventuellement de mathématiques. Puis, 3 années de doctorat et 3 années de postdoctorat.*
Autres métiers : *géotechnicien(ne), géologue.*

L'astronome étudie l'univers qui nous entoure, ses origines et son évolution. Il peut faire le choix de se spécialiser dans le domaine de l'astrophysique (physique appliquée à l'astronomie).



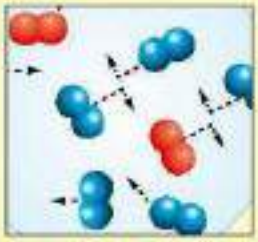
Avant d'aborder le chapitre

EN AUTONOMIE

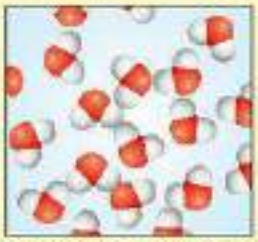
LES ACQUIS INDISPENSABLES

1re Enseignement de spécialité

- La **masse volumique** reflète l'état de dispersion des constituants microscopiques d'un fluide.



Particules dispersées dans un gaz



Particules proches dans un liquide

- La **force pressante** modélise l'action mécanique d'un fluide sur une surface. Sa valeur s'écrit :

$F = P \cdot S$

F : valeur de la force pressante (en N) ; S : aire de la surface (en m^2) ; P : pression du fluide (en Pa)

- La **loi fondamentale de la statique des fluides** exprime la relation qui existe entre la différence de pression, la masse volumique, l'intensité de pesanteur et la différence d'altitude entre deux points A et B d'un fluide au repos :

$\Delta P = \rho \cdot g \cdot \Delta z$

$\Delta P = P_B - P_A$ (différence de pression, en Pa) ; $\Delta z = z_A - z_B$ (différence d'altitude, en m) ; ρ : masse volumique du fluide (en $kg \cdot m^{-3}$) ; g : intensité de pesanteur ($9{,}8\ N \cdot kg^{-1}$ à la surface de la Terre)

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

Pour chaque situation, rédiger une réponse qui explique en quelques lignes le raisonnement.

SITUATION 1

Attribuer une valeur de masse volumique (à 20 °C et 1 013 hPa) aux fluides suivants : eau liquide et gaz air.

Valeurs : $\rho_1 = 1{,}20\ kg \cdot m^{-3}$, $\rho_2 = 9{,}98 \times 10^2\ kg \cdot m^{-3}$

SITUATION 2

En choisissant une échelle adaptée, représenter la force pressante modélisant l'action de l'air (à la pression $P = 1\,013$ hPa) sur 50 cm^2 de la surface extérieure d'un ballon.





SITUATION 3

Un plongeur prévoit de s'immerger à une profondeur de 15 m sous la surface de l'eau ($\rho = 1\,000\ kg \cdot m^{-3}$).

Quelle est la variation maximale de pression qu'il subira lors de sa plongée ?



CHAPITRE

14

PHYSIQUE

Écoulement d'un fluide



Dans le sport automobile, l'effet de sol est mis à profit pour accroître l'adhérence des véhicules au circuit et les « coller » à la piste. Comment interpréter ce phénomène aérodynamique ?

→ EXERCICE 27

NOTIONS ET CONTENUS

- Poussée d'Archimède.
- Écoulement d'un fluide en régime permanent.
- Débit volumique d'un fluide incompressible.
- Relation de Bernoulli.
- Effet Venturi.

CAPACITÉS EXPÉRIMENTALES

- Mettre en œuvre un dispositif permettant de tester ou d'exploiter l'expression de la poussée d'Archimède. → Activité 1 → Pour préparer l'ECE
- Mettre en œuvre un dispositif expérimental pour étudier l'écoulement permanent d'un fluide. → Activité 2 → Pour préparer l'ECE
- Mettre en œuvre un dispositif expérimental pour tester la relation de Bernoulli. → Activité 3 → Pour préparer l'ECE

TP

COMPÉTENCES :
(VAL) Estimer une incertitude
(REA) Effectuer des procédures courantes (calculs, représentations, collectes de données, etc.)

La poussée d'Archimède

Un iceberg est bloc d'eau douce flottant dans les océans. Comment expliquer qu'environ 1/10 seulement de son volume émerge de la surface de l'eau ?



DONNÉES

- Intensité de pesanteur : $g = 9{,}81\ m \cdot s^{-2}$.
- Masses volumiques : $\rho_{glace} = 910\ kg \cdot m^{-3}$; $\rho_{eau\ à\ 20\ °C} = 998\ kg \cdot m^{-3}$; $\rho_{eau\ des\ océans} = 1\,024\ kg \cdot m^{-3}$; $\rho_{acier} = 7\,850\ kg \cdot m^{-3}$

DOC 1 Du matériel utile

Un dynamomètre et son support, un objet (en acier par exemple), une balance électronique, une éprouvette graduée, un vase de Boudreau (récipient à trop plein), de l'eau, un bécher.

DOC 2 La poussée d'Archimède

Tout corps plongé dans un fluide subit une action mécanique exercée par ce fluide et modélisée par une force verticale, dirigée de bas en haut, de valeur égale au poids du volume de fluide déplacé.

Cette force est appelée **poussée d'Archimède** $\vec{\pi}$:

$$\vec{\pi} = -m_f \cdot \vec{g} = -\rho_f \cdot V \cdot \vec{g}$$

m_f : masse de fluide déplacé en **kg**, ρ_f : masse volumique du fluide en **kg · m⁻³**, V : volume de fluide déplacé en **m³**, g : intensité de pesanteur en **N · kg⁻¹** (ou **m · s⁻²**), π en newton (**N**).

DÉMARCHE EXPERTE

À l'aide du matériel décrit (doc. 1) et en tenant compte de sa précision (FICHE MÉTHODE ➡ p. 538), proposer une stratégie pour valider l'expression de la poussée d'Archimède (doc. 2). Exploiter cette expression afin de déterminer le volume de la partie émergée d'un iceberg.

DÉMARCHE AVANCÉE

1. a. À l'aide du matériel décrit (doc. 1), réaliser les mesures permettant de donner un encadrement (FICHE MÉTHODE ➡ p. 538) de la valeur :
– du poids du volume de fluide déplacé par un objet totalement immergé dans l'eau ;
– de la force qui modélise l'action mécanique exercée par l'eau sur l'objet immergé.

b. Les mesures permettent-elles de valider l'expression de la poussée d'Archimède (doc. 2) ?

2. a. À partir d'un bilan des actions mécaniques agissant sur un iceberg flottant à la surface de l'eau, écrire une relation entre $V_{immergé}$ (le volume immergé de l'iceberg), $V_{iceberg}$ (son volume total) et les masses volumiques ρ_{glace} et $\rho_{eau\ des\ océans}$.

b. En déduire qu'environ $^1/_{10}$ du volume total d'un iceberg émerge de la surface de l'eau.

BONUS

Principe d'Archimède

Une animation pour comprendre le principe d'Archimède



DÉMARCHE ÉLÉMENTAIRE

1. a. À l'aide du dynamomètre (doc. 1), mesurer les valeurs P_1 du poids de l'objet et P_2 du poids « apparent » de l'objet totalement immergé dans l'eau. En déduire un encadrement (FICHE MÉTHODE ➡ p. 538) de la valeur π de la poussée d'Archimède (doc. 2).

b. Mesurer par déplacement d'eau la masse m du volume de fluide déplacé par l'objet totalement immergé. En déduire un encadrement de la valeur P_{eau} du poids de ce volume d'eau.

c. Comparer les valeurs π et P_{eau}. L'expression de la poussée d'Archimède peut-elle être validée ?

2. a. Un iceberg flotte à la surface de l'eau. Que peut-on dire des actions mécaniques qui agissent sur lui ? Les modéliser par deux forces sur un schéma sans souci d'échelle.

b. Montrer qu'il est possible d'établir la relation : $V_{immergé} = \dfrac{\rho_{glace}}{\rho_{eau\ des\ océans}} V_{iceberg}$ (avec $V_{immergé}$ le volume immergé de l'iceberg et $V_{iceberg}$ son volume total).

c. En déduire qu'environ $^1/_{10}$ du volume total d'un iceberg émerge de la surface de l'eau.

Je réussis si…

- **Je sais confronter un modèle à des résultats expérimentaux.**
- **Je sais exploiter l'expression de la poussée d'Archimède.**

TP

COMPÉTENCES :
(RÉA) Mettre en œuvre un protocole expérimental
(VAL) Confronter un modèle à des résultats expérimentaux

Les grandeurs caractéristiques de l'écoulement d'un fluide

Le débit volumique et la vitesse d'un fluide sont deux grandeurs physiques qui caractérisent son écoulement dans un conduit. Quel lien établir entre elles en régime permanent ?

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Au cours de son écoulement dans une burette graduée de 25,0 mL, la position et la vitesse de surface libre (surface en contact avec l'air) d'un fluide varient. On peut suivre ces évolutions en analysant son mouvement à l'aide d'une caméra reliée à un ordinateur et d'un logiciel de traitement d'images (FICHE PRATIQUE ➡ p. 586).

Choisir la position de la surface libre du fluide au repos comme origine du repère et un axe vertical orienté vers le bas.

GESTE ECE n° 6

Flash PAGE vidéo

DOC 1 Matériel nécessaire



DOC 2 Vitesse et débit volumique

Lors de l'écoulement d'un fluide incompressible en **régime permanent**, la **vitesse** du fluide traversant une section du conduit et son **débit volumique** conservent la même valeur au cours du temps.

Le **débit volumique** d'un fluide est le rapport suivant :

débit volumique (en $m^3 \cdot s^{-1}$) → $Q = \frac{V}{\Delta t}$ ← volume de fluide écoulé (en m^3) ; durée de l'écoulement (en s)

VIDÉO

Écoulements dans une bouteille percée

Une vidéo qui montre les écoulements produits par une bouteille percée remplie d'eau.



Flash PAGE vidéo

EXPLOITATION ET ANALYSE

1 On étudie la phase de l'affaissement de la surface libre de 0 à 5 mL.

a. Montrer l'évolution de la position y d'un point M de la surface libre du fluide en fonction du temps.

b. En déduire, en explicitant le raisonnement suivi :
- la vitesse v d'écoulement du fluide ;
- l'évolution du volume V du fluide écoulé en fonction du temps.

c. Dire comment on peut en déduire la valeur du débit volumique Q.

2 On étudie maintenant la phase de l'affaissement de la surface libre de 20 à 25 mL.

Reprendre la même démarche que pour la phase de la partie 1 et répondre aux questions.

CONCLUSION

3 a. En raisonnant sur les unités des grandeurs, quelle relation peut-on établir entre le débit volumique Q d'un fluide et sa vitesse v d'écoulement ?

b. Cette relation est-elle vérifiée dans l'étude expérimentale effectuée ?

c. Discuter du caractère permanent ou non de l'écoulement lors de cette même étude.

Je réussis si...

- **Je sais effectuer un enregistrement vidéo.**
- **Je sais utiliser un logiciel de pointage et un tableur.**
- **J'ai fait le lien entre régime permanent d'un écoulement, débit volumique et vitesse du fluide.**

TP

COMPÉTENCES :
(RÉA) Mettre en œuvre les étapes d'une démarche
(VAL) Confronter un modèle à des résultats expérimentaux

Relation de Bernoulli



SITUATION-PROBLÈME

L'athérosclérose est une maladie conduisant localement à un rétrécissement du diamètre des artères. Elle s'accompagne d'une chute de la pression artérielle au niveau de la sténose.

Comment expliquer ce phénomène et le vérifier expérimentalement ?

HYPOTHÈSE Proposer une réponse à la question en la justifiant.

DOC 1 Modélisation en laboratoire

L'écoulement du sang dans une artère sténosée (rétrécie) peut être modélisé par un écoulement d'air dans un conduit de section variable (ici deux bouteilles en matière plastique reliées entre elles avec un écoulement assuré par un aspirateur). Des trous réalisés à différents emplacements du conduit permettent d'accéder à la pression du fluide au moyen d'un capteur de pression.



DOC 2 La relation de Bernoulli

La relation de Bernoulli modélise l'écoulement permanent d'un fluide sans frottement. Elle lie la pression P, la vitesse v et l'altitude z d'un point du fluide. Sur une même ligne de courant on a :

pression du fluide (en Pa) ; intensité de pesanteur (en $N \cdot kg^{-1}$) ; altitude (en m)

$$P + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot z = \text{constante}$$

masse volumique du fluide (en $kg \cdot m^{-3}$) ; vitesse du fluide (en $m \cdot s^{-1}$)

Une **ligne de courant** est une courbe tangente à la vitesse d'un fluide.

Dans le cas où z = constante, sur une même ligne de courant : $P + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = \text{constante}$.

DOC 3 Conservation du débit volumique

Lors de l'écoulement permanent d'un fluide incompressible, il n'y a pas de perte de matière. Le débit volumique Q du fluide traversant n'importe quelle section du conduit se conserve.

MESURES ET ANALYSE

1 Mettre en œuvre le dispositif expérimental modélisant l'écoulement du sang dans une artère sténosée (doc. 1), et relever différents couples de valeurs (P, $\varnothing$) : pression-diamètre du conduit.

2 Utiliser un tableur grapheur pour calculer, à partir du débit volumique (doc. 3), la vitesse v du fluide pour chaque diamètre $\varnothing$ du conduit.

3 Faire afficher le graphe $P = f(v^2)$ représentant l'évolution de la pression du fluide en fonction du carré de sa vitesse puis modéliser l'évolution par une fonction adaptée.

4 La courbe tracée permet-elle de vérifier la relation de Bernoulli (doc. 2) ?

DONNÉES

- ρ_{air} = 1,184 $kg \cdot m^{-3}$ à 25 °C.
- Débit volumique Q de l'air dans le conduit (voir notice du système utilisé).

CONCLUSION

5 Expliquer qualitativement le lien entre le diamètre d'un conduit et la pression du fluide qui s'y écoule afin de justifier la baisse de pression artérielle constatée lors d'une athérosclérose.

Je réussis si...

- **Je sais formuler une hypothèse.**
- **Je sais mesurer la pression d'un fluide et utiliser un tableur.**
- **J'ai compris que la relation de Bernoulli permet de modéliser l'écoulement d'un fluide.**
- **Je sais faire le lien entre la pression d'un fluide et sa vitesse.**

COMPÉTENCES :
(RÉA) Utiliser un modèle
(COM) Présenter une démarche de manière argumentée, synthétique et cohérente

Hauteur d'un jet d'eau



SITUATION-PROBLÈME

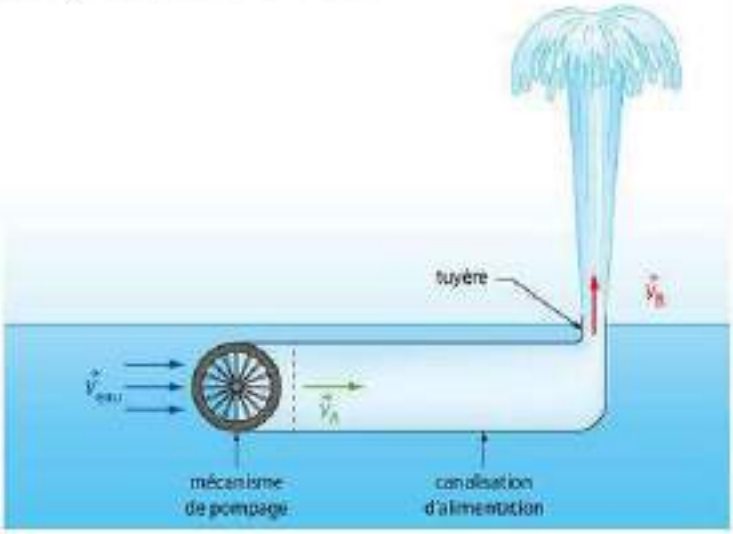
Il existe des jets d'eau dans le monde qui s'élèvent à plusieurs centaines de mètres de haut, véritable spectacle de jour comme de nuit. Celui de Genève (Suisse) fait preuve d'ingéniosité en matière hydraulique.

Comment prévoir sa hauteur maximale ?

COUP DE POUCE ➡ p. 593

DOC 1 Schéma de l'installation hydraulique

Le jet d'eau de Genève est produit au moyen d'une station de pompage de l'eau du lac Léman. Elle est constituée par deux puissantes pompes qui alimentent une large canalisation puis font jaillir l'eau par une tuyère de plus faible diamètre.



DONNÉES

- $\rho_{eau} = 9{,}99 \times 10^2$ kg · m^{-3} à 15 °C
- $g = 9{,}81$ N · kg^{-1}
- $P_{atm} = 1013$ hPa
- 1 bar = 10^5 Pa

DOC 2 Quelques caractéristiques techniques de l'installation



- Diamètre de la canalisation d'alimentation : 1,00 m
- Pression de l'eau en sortie de pompe : 16,5 bar
- Nombre de pompes : 2
- Puissance électrique de chaque pompe : 500 kW
- Débit volumique d'une pompe : 250 L · s^{-1}
- Tuyère de sortie (↑) : anneau creux d'environ 2 cm de large et de 16 cm de diamètre équivalent à un orifice de sortie de 10,7 cm de diamètre
- Nombre de projecteurs : 12
- Puissance de l'éclairage : 9 000 W

DOC 3 La relation de Bernoulli

La relation de Bernoulli modélise l'écoulement permanent d'un fluide sans frottement. Elle lie la pression P, la vitesse v et l'altitude z le long d'une ligne de courant dans un fluide. Ainsi, pour deux points A et B d'une même ligne de courant, on a :

pression du fluide (en Pa) ; intensité de pesanteur (en N · kg^{-1}) ; altitude (en m)

$$P_A + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_A^2 + \rho \cdot g \cdot z_A = P_B + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_B^2 + \rho \cdot g \cdot z_B$$

masse volumique du fluide (en kg · m^{-3}) ; vitesse du fluide (en m · s^{-1})

Je réussis si…

- **Je sais identifier les étapes d'une stratégie de résolution.**
- **Je sais appliquer la relation de Bernoulli à l'écoulement de l'eau.**
- **Je sais valider la valeur obtenue à partir de la photo du jet d'eau.**

1 La poussée d'Archimède

Origine de la poussée d'Archimède

Tout objet plongé dans un fluide (un liquide ou un gaz), subit de la part de ce fluide des actions mécaniques qui agissent sur sa surface en contact avec le fluide. Ces actions sont modélisées par des **forces pressantes** $\vec{F}$ dont la valeur F augmente avec la pression P du fluide (et l'aire S de la surface de l'objet) : $F = P \cdot S$.

Par ailleurs, d'après la **loi fondamentale de la statique des fluides** ($\Delta P = \rho \cdot g \cdot \Delta z$) la pression P exercée par un fluide augmente avec la profondeur d'immersion (FIG. 1).

Ainsi, les forces pressantes $\vec{F}$ qui modélisent les actions mécaniques du fluide sur la surface d'un objet immergé ne se compensent pas parfaitement : elles sont plus intenses sur le bas de l'objet que sur le haut (FIG. 2a). Il en résulte une action mécanique modélisée par une force verticale et orientée vers le haut : la poussée d'Archimède $\vec{\pi}$ (FIG. 2b).

Expression vectorielle de la poussée d'Archimède

Tout corps immergé, tout ou en partie, dans un fluide, subit de la part du fluide des actions mécaniques modélisées par une **force verticale, dirigée vers le haut de valeur égale au poids du volume de fluide déplacé** (FIG. 3).

L'expression de cette force nommée **poussée d'Archimède** $\vec{\pi}$ est :

poussée d'Archimède de valeur π (N)

masse volumique du fluide (kg · m^{-3})

$$\vec{\pi} = -m_f \cdot \vec{g} = -\rho_f \cdot V \cdot \vec{g}$$

champ de pesanteur terrestre d'intensité g (N · kg^{-1} ou m · s^{-2})

masse du fluide déplacé (kg) — volume du fluide déplacé (m^3)

EXEMPLE

Une bille en acier (de volume $V = 5{,}0$ cm^3 et de masse volumique $\rho_{fer} = 7{,}8 \times 10^3$ kg · m^{-3}) totalement immergée dans l'eau ($\rho_{eau} = 1{,}0 \times 10^3$ kg · m^{-3}) subit une poussée $\vec{\pi}$ verticale dirigée vers le haut de valeur $\pi = \rho_f \cdot V \cdot g$.

AN : $\pi = 1{,}0 \times 10^3 \times 5{,}0 \times 10^{-6} \times 9{,}8 = 4{,}9 \times 10^{-2}$ N.

Exploitation de l'expression de la poussée d'Archimède

La **poussée d'Archimède** $\vec{\pi}$ a la même direction que le champ de pesanteur terrestre $\vec{g}$ mais est de sens opposé : il s'agit donc d'une force toujours verticale et orientée vers le haut. Dans le champ de pesanteur $\vec{g}$ constant, sa **valeur** $\pi = \rho_f \cdot V \cdot g$ dépend du volume V du corps immergé et de la masse volumique ρ_f du fluide. La masse du corps, sa forme, son orientation dans le fluide et la profondeur d'immersion (pour un corps totalement immergé), n'influent pas sur sa valeur.

Remarque. Plus le corps immergé est volumineux ou plus le fluide est dense (ou les deux à la fois) et plus la valeur de la poussée d'Archimède est grande.

Les paramètres d'influence de la poussée d'Archimède sont largement mis en jeu en aéronautique, en plongée sous-marine ou encore dans la construction navale.

EXEMPLE

Les bateaux sont conçus de telle sorte que le poids du volume d'eau déplacé (donc la valeur de la poussée d'Archimède) est toujours égal au poids du bateau (et de son contenu).

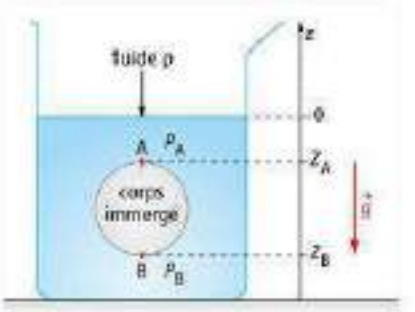


FIG. 1 $z_B < z_A$ donc $P_B > P_A$.
La pression du fluide est plus importante en B qu'en A.

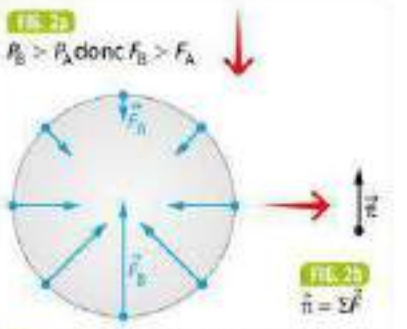


FIG. 2 Modélisation de la poussée d'Archimède.

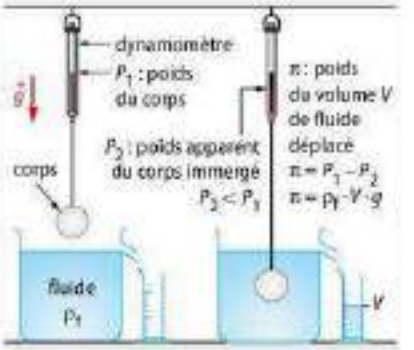


FIG. 3 La poussée d'Archimède $\vec{\pi}$ est responsable du poids apparent $\vec{P_2}$ du corps immergé dans le fluide.

BONUS Poussée d'Archimède vidéo



Une vidéo pour expliquer l'expression de la poussée d'Archimède.

2 Écoulement d'un fluide incompressible

Régime permanent d'écoulement d'un fluide

L'**écoulement** d'un fluide est modélisé par des **lignes de courant.** Ces lignes représentent les trajectoires des particules du fluide en mouvement (FIG. 4).

On dit qu'un fluide s'écoule en **régime permanent** (ou stationnaire) lorsque les lignes de courant n'évoluent pas au cours du temps : la vitesse $\vec{v}$ en un point quelconque du fluide conserve alors les mêmes caractéristiques au cours du temps.

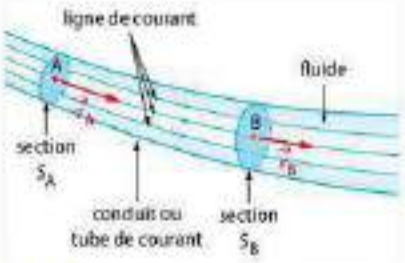


FIG. 4 Modélisation de l'écoulement d'un fluide incompressible.

EXEMPLE

Sur la figure 4, si $\vec{v}_A$ et $\vec{v}_B$ ne varient pas au cours du temps alors le régime est permanent. $\vec{v}_A$ peut être différent de $\vec{v}_B$ (en direction et en valeur).

Débit volumique et vitesse d'un fluide incompressible

Le **débit volumique** Q d'un fluide représente le volume de fluide qui traverse une section S du conduit par unité de temps (FIG. 5).

débit volumique ($m^3 \cdot s^{-1}$) → $Q = \dfrac{V}{\Delta t}$ ← volume de fluide écoulé (m^3) ; ← durée de l'écoulement (s)

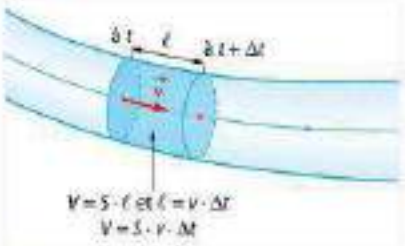


FIG. 5 Volume V et vitesse v d'un fluide traversant la section S d'un conduit.

EXEMPLE

Chaque jour, la Loire rejette près de 80×10^7 m³ d'eau dans l'océan. Son débit volumique moyen est :

$Q = \dfrac{80 \times 10^6}{24 \times 3600} = 926 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 9{,}3 \times 10^2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Si un fluide traverse à la vitesse $\vec{v}$ la section d'aire S d'un conduit en une durée Δt alors le volume V de fluide ayant traversé S peut s'écrire : $V = S \cdot v \cdot \Delta t$ (FIG. 5).

Il vient alors : $Q = \dfrac{V}{\Delta t} = \dfrac{S \cdot v \cdot \Delta t}{\Delta t} = v \cdot S$.

La **relation** entre le **débit volumique** Q_v et la **vitesse** v du fluide s'écrit :

débit volumique ($m^3 \cdot s^{-1}$) → $Q = v \cdot S$ ← aire de la section du conduit (m^2) ; ← vitesse du fluide ($m \cdot s^{-1}$)

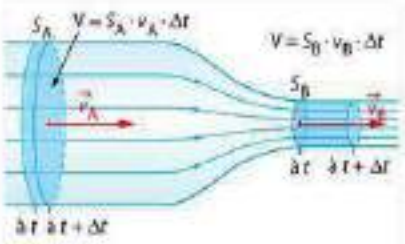


FIG. 6 Pendant une durée Δt, le même volume V de fluide traverse les sections S_A et S_B.

En **régime permanent**, le débit volumique d'un fluide traversant la section S d'un conduit est constant au cours du temps.

Conservation du débit volumique

Lors de l'écoulement d'un fluide incompressible en régime permanent, il n'y a pas de perte de matière (FIG. 6).

En régime permanent, il y a **conservation du débit volumique** Q d'un fluide incompressible le long d'un écoulement donc en tous points A et B d'un écoulement on a : $Q_{(A)} = Q_{(B)}$ soit $v_A \cdot S_A = v_B \cdot S_B$.

La vitesse v du fluide et l'aire S de la section traversée sont deux grandeurs inversement proportionnelles : $\dfrac{v_B}{v_A} = \dfrac{S_A}{S_B}$.

Si $S_A > S_B$ alors $v_B > v_A$ (FIG. 6). **La vitesse du fluide augmente lorsque la section du conduit rétrécie.** (FIG. 7).



FIG. 7 La vitesse d'écoulement de l'eau est triplée lorsque l'aire de la section d'un tuyau d'arrosage est divisée par 3. (si $\dfrac{S_A}{S_B} = 3$ alors $v_B = \dfrac{S_A}{S_B} \cdot v_A = 3 \cdot v_A$).

3 Relation de Bernoulli et conséquences

Relation de Bernoulli

Pour l'écoulement d'un fluide incompressible en régime permanent et sans frottement (donc sans échange d'énergie ni par travail ni par transfert thermique), la **relation de Bernoulli** modélise les évolutions de la pression P, de la vitesse v et de l'altitude z le long d'une ligne de courant dans un fluide de masse volumique ρ dans le champ de pesanteur $\vec{g}$:

masse volumique du fluide ($kg \cdot m^{-3}$) — altitude (m)

pression du fluide (Pa) → $P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho \cdot g \cdot z = \text{constante}$

vitesse du fluide ($m \cdot s^{-1}$) — intensité de pesanteur ($N \cdot kg^{-1}$)

Pour deux points A et B d'une même ligne de courant (FIG. 8), cette relation s'écrit : $P_A + \frac{1}{2}\rho \cdot v_A^2 + \rho \cdot g \cdot z_A = P_B + \frac{1}{2}\rho \cdot v_B^2 + \rho \cdot g \cdot z_B$.

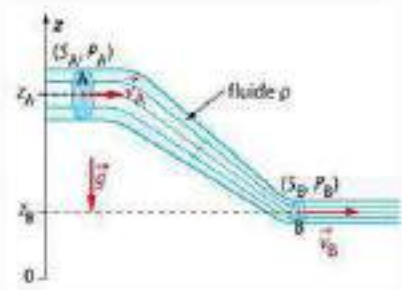


FIG. 8 En régime permanent, sur une même ligne de courant les grandeurs caractéristiques du fluide qui s'écoule (P, ρ, v, z) sont liées par la relation de Bernoulli.

La relation de Bernoulli traduit la conservation de l'énergie totale d'un fluide le long d'une ligne de courant. Elle permet d'interpréter le comportement des fluides dans de nombreux domaines : les écoulements sanguins en médecine, le mouvement des masses d'air et d'eau en géophysique, les flux d'air en aéronautique, l'écoulement de l'eau dans les réseaux d'alimentation.

EXEMPLE

La vitesse de l'eau en sortie du robinet d'une installation domestique alimentée par un château peut être estimée à partir de relation de Bernoulli (FIG. 9) :

$P_A + \frac{1}{2}\rho \cdot v_A^2 + \rho \cdot g \cdot z_A = P_B + \frac{1}{2}\rho \cdot v_B^2 + \rho \cdot g \cdot z_B$ s'écrit dans ce cas

$P_{atm} + \rho \cdot g \cdot z_A = P_{atm} + \frac{1}{2}\rho \cdot v_B^2$. Après simplification il vient $v_B = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$.

Pour une hauteur h = 10 m alors $v_B = \sqrt{2 \times 9{,}8 \times 10} = 14\ m \cdot s^{-1}$.

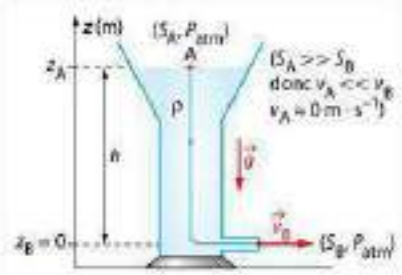


FIG. 9 La vitesse v_B de l'eau du robinet dépend de la hauteur d'eau h dans le château.

Remarque. Si le fluide est au repos ($v = 0\ m \cdot s^{-1}$), la relation devient : $P_A + \rho \cdot g \cdot z_A = P_B + \rho \cdot g \cdot z_B$ que l'on écrit également $\Delta P = \rho \cdot g \cdot \Delta z$. On retrouve la loi fondamentale de la statique des fluides.

Effet Venturi

Dans le cas d'un conduit horizontal, $z_A = z_B$ et la relation de Bernoulli s'écrit :

$P + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{constante}$ soit $P_A + \frac{1}{2}\rho \cdot v_A^2 = P_B + \frac{1}{2}\rho \cdot v_B^2$.

Il vient alors $(P_A - P_B) = \frac{1}{2}\rho \cdot (v_B^2 - v_A^2)$. Ainsi si $v_A < v_B$ alors $P_A > P_B$.

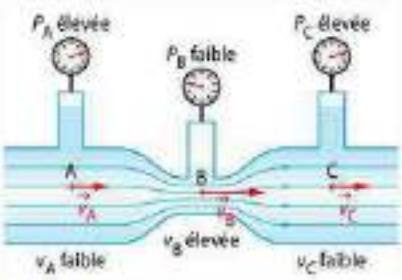
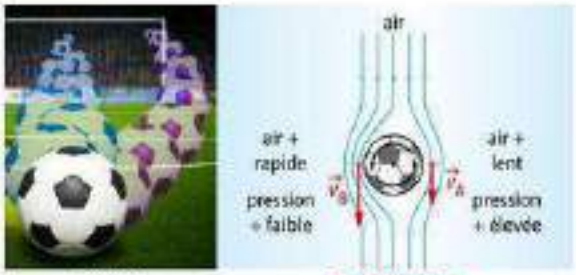


FIG. 10 Effet Venturi : $v_B > v_A$ alors $P_B < P_A$.

Pour un écoulement en régime permanent, **la pression P d'un fluide diminue lorsque sa vitesse v augmente** (et inversement) : il s'agit de **l'effet Venturi** (FIG. 10).

EXEMPLE

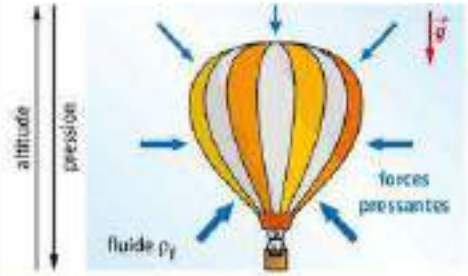
Dans de nombreux sports, l'effet Magnus est à l'origine de trajectoires surpenantes. En imposant un mouvement de rotation (« un effet ») à une balle se déplaçant dans l'air, la vitesse de l'air va augmenter d'un côté de la balle et diminuer de l'autre. Il en résulte une différence de pression de l'air entre les deux côtés de la balle et une action mécanique de l'air sur la balle qui modifie son mouvement (FIG. 11).



Effet Magnus. FIG. 11 ▶ **Réalité** *Référentiel terrestre* — **Modélisation** *Référentiel de la balle*

1 La poussée d'Archimède

Origine



Modélisation



Expression

poussée d'Archimède de valeur π (N) — volume du fluide déplacé (m^3)

$$\vec{\pi} = -\rho_f \cdot V \cdot \vec{g}$$

champ de pesanteur terrestre d'intensité g ($N \cdot kg^{-1}$ ou $m \cdot s^{-2}$)

masse volumique du fluide ($kg \cdot m^{-3}$)

2 Écoulement d'un fluide incompressible

Le **débit volumique** d'un fluide dépend de la vitesse du fluide et de la section du conduit :

volume de fluide écoulé (m^3) — vitesse du fluide ($m \cdot s^{-1}$)

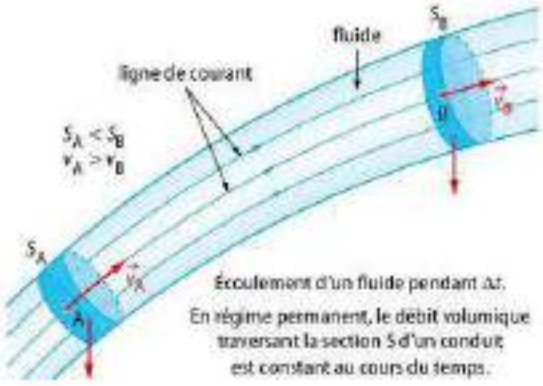
$$Q = \frac{V}{\Delta t} = v \cdot S$$

débit volumique ($m^3 \cdot s^{-1}$) — aire de la section du conduit (m^2)

durée de l'écoulement (s)

Conservation du débit volumique

$Q_{(A)} = Q_{(B)}$ (en régime permanent, le long d'une ligne de courant)



3 Relation de Bernoulli et conséquences

Lors de l'écoulement d'un fluide incompressible en régime permanent les évolutions de la pression, de la vitesse et de l'altitude le long d'une ligne de courant sont modélisées par la **relation de Bernoulli** :

masse volumique du fluide ($kg \cdot m^{-3}$) — altitude (m)

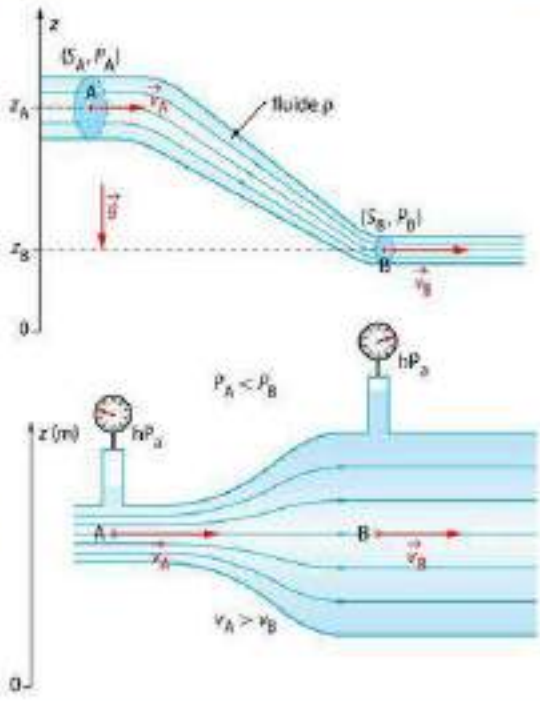
$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho \cdot g \cdot z = \text{constante}$$

pression du fluide (Pa)

vitesse du fluide ($m \cdot s^{-1}$) — intensité de pesanteur ($N \cdot kg^{-1}$)

Effet Venturi

En régime permanent, la pression P d'un fluide diminue lorsque sa vitesse v augmente.



Vérifier l'essentiel

EN AUTONOMIE

Pour chaque question, choisir la ou les bonnes réponses. ➡ SOLUTIONS EN PAGE 593

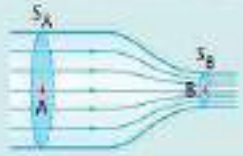
Flash PAGE corrigés détaillés

Flash PAGE QCM interactifs

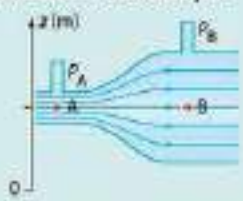
1 La poussée d'Archimède

	A	B	C
1 La poussée d'Archimède a pour origine :	l'attraction exercée par la Terre.	les variations de la pression au sein d'un fluide.	les frottements exercés par un fluide.
2 La poussée d'Archimède est une force :	toujours verticale et dirigée vers le bas.	de valeur égale à celle du poids du volume de fluide déplacé.	dont la valeur dépend de la masse volumique du corps immergé.
3 Pour un corps de volume V et de masse volumique ρ plongé dans un fluide de masse volumique ρ_f, l'expression vectorielle de la poussée d'Archimède $\vec{\pi}$ est :	$\vec{\pi} = -\rho \cdot V \cdot \vec{g}$	$\vec{\pi} = \rho_f \cdot V \cdot \vec{g}$	$\vec{\pi} = -\rho_f \cdot V \cdot \vec{g}$

2 Écoulement d'un fluide incompressible

	A	B	C
4 Le débit volumique d'un fluide traversant la section d'un conduit est proportionnel :	au volume V écoulé et à la durée d'écoulement Δt.	à la vitesse v du fluide qui s'écoule.	à l'aire S de la section du conduit.
5 En régime permanent, l'écoulement d'un fluide traversant la section d'un conduit est caractérisé par :	un débit volumique et une vitesse du fluide constants.	un débit volumique constant mais une vitesse du fluide pouvant varier.	un débit volumique et une vitesse du fluide pouvant varier.
6 Dans l'écoulement suivant : 	$Q_{(A)} > Q_{(B)}$ et $v_A < v_B$	$Q_{(A)} = Q_{(B)}$ et $v_A = v_B$	$Q_{(A)} = Q_{(B)}$ et $v_A < v_B$

3 Relation de Bernoulli et conséquences

	A	B	C
7 Pour l'écoulement d'un fluide incompressible en régime permanent, la relation de Bernoulli pour tout point d'une ligne de courant :	relie la pression au volume et à l'altitude.	relie la pression à la vitesse et à l'altitude.	relie le poids à la vitesse et à l'altitude.
8 À altitude constante, la relation de Bernoulli :	permet de modéliser l'effet Venturi.	s'écrit $P + \frac{1}{2}\rho \cdot v^2 = \text{constante}$.	s'écrit $(P_A - P_B) = \frac{1}{2}\rho \cdot (v_A^2 - v_B^2)$.
9 Dans l'écoulement suivant, l'effet Venturi se traduit par : 	$v_A > v_B$ et $P_A > P_B$	$v_A = v_B$ et $P_A = P_B$	$v_A > v_B$ et $P_A < P_B$

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Acquérir les bases

1 La poussée d'Archimède

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Poussée d'Archimède
- Savoir expliquer qualitativement l'origine de la poussée d'Archimède.
- Utiliser l'expression vectorielle de la poussée d'Archimède.
- Tester ou exploiter l'expression de la poussée d'Archimède.

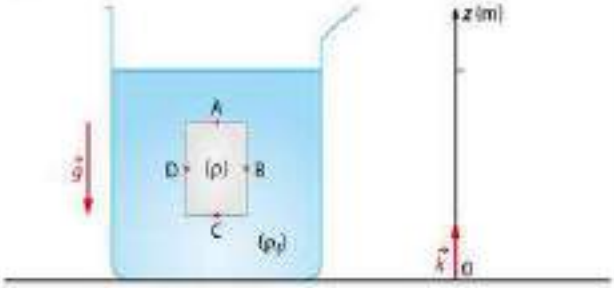
➡ Acquérir les bases : 11 ➡ S'entraîner : 25 26

DONNÉES

- $g = 9{,}81\ N \cdot kg^{-1}$; $\rho_{eau\ de\ mer} = 1\,025\ kg \cdot m^{-3}$; $\rho_{eau} = 1{,}0 \times 10^{3}\ kg \cdot m^{-3} = 1{,}0\ g \cdot cm^{-3}$; $\rho_{éthanol} = 0{,}79\ g \cdot cm^{-3}$

10 Origine de la poussée d'Archimède

Un corps cylindrique (de volume V et de masse volumique ρ) immergé dans un fluide (de masse volumique ρ_f) est immobile.



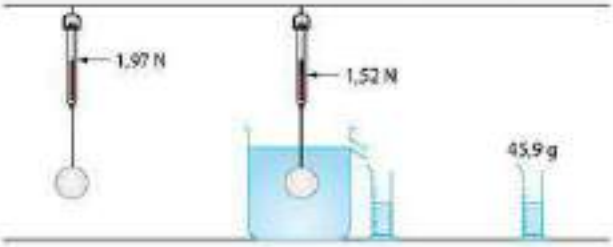
1. a. Représenter sans souci d'échelle les forces qui modélisent les actions mécaniques du fluide sur la surface du corps aux points A, B, C et D.
b. Ces forces se compensent-elles ? Justifier.

2. a. Donner les caractéristiques de la résultante des forces qui modélise l'action du fluide sur le corps immergé. La nommer et la représenter sans souci d'échelle sur un schéma.
b. Écrire son expression vectorielle en fonction du champ de pesanteur terrestre $\vec{g}$ puis en fonction du vecteur unitaire $\vec{k}$.

11 Valeur de la poussée d'Archimède

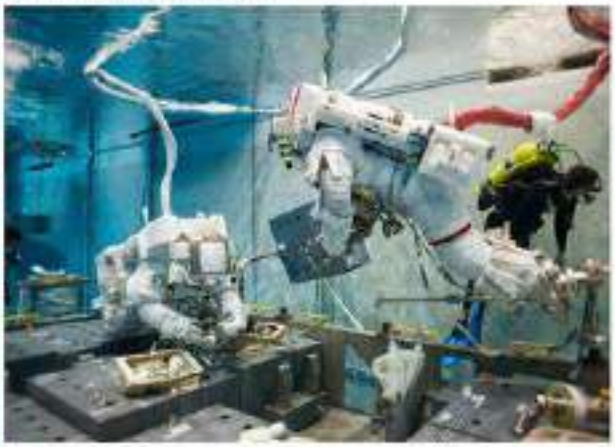
1. Qu'appelle-t-on poussée d'Archimède $\vec{\pi}$? En donner les caractéristiques (direction, sens et valeur)

2. À partir des expériences suivantes, déterminer de deux manières différentes la valeur π de la poussée d'Archimède qui modélise l'action du fluide sur le corps immergé.



12 Entraînement des spationautes

Afin de simuler l'état d'impesanteur, les spationautes équipés de leur combinaison s'entraînent aux exercices dans l'espace dans une piscine.



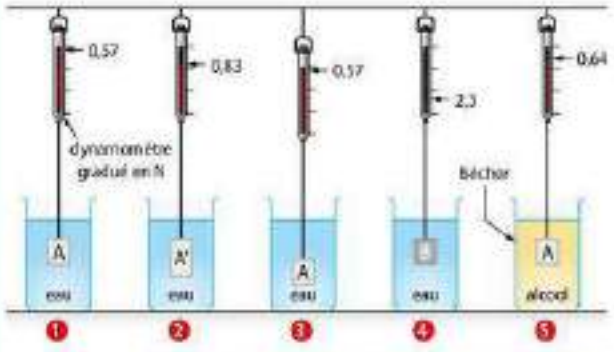
1. Calculer la valeur P_1 du poids et π de la poussée d'Archimède exercée sur un spationaute ($V = 0{,}19\ m^3$, $m = 200$ kg) entièrement immergé.

2. Représenter ces forces sur un schéma en choisissant une échelle adaptée.

3. En déduire le poids apparent P_2 ressenti par le spationaute. À quelle masse cela correspondrait-il hors de l'eau ?

13 Paramètres d'influence de la poussée d'Archimède

1. Écrire l'expression vectorielle de la poussée d'Archimède. Préciser le nom et l'unité de chaque grandeur.
Pour tester cette expression, on réalise la série d'expériences suivantes.



	A'	A	B
Matériau	Aluminium		Acier
Volume	$V_2 = 50$ mL	$V_1 = 34$ mL	
Masse	$m_{A'} = 135$ g	$m_A = 91{,}8$ g	$m_B = 267$ g

2. Calculer la valeur du poids P de chaque cylindre A, A' et B.

3. a. Identifier les paramètres mis en jeu au cours des différentes expériences.
b. Indiquer en justifiant ceux qui ont une influence sur la valeur de la poussée d'Archimède.
c. Ces résultats valident-ils l'expression de la poussée d'Archimède ?

2 Écoulement d'un fluide incompressible

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Écoulement d'un fluide en régime permanent.
Débit volumique d'un fluide incompressible
- Étudier l'écoulement d'un fluide incompressible.
- Savoir calculer un débit volumique et la vitesse d'un fluide.
- Savoir exploiter la conservation du débit volumique.

➥ Acquérir les bases : 15 ➥ S'entraîner : 27 28

14 À la station-service

1. a. Estimer la durée nécessaire pour faire le plein en carburant d'un véhicule dont le volume du réservoir est de 50 L.

b. Définir le débit volumique Q d'un fluide et calculer la valeur de celui produit par la pompe à carburant.

c. Comparer le résultat obtenu à la valeur du débit moyen d'une pompe standard : $Q = 4{,}0 \times 10^{-4}$ m$^3 \cdot$ s^{-1}.

2. Le diamètre intérieur du tuyau de refoulement est de 16 mm.

a. Calculer l'aire S d'une section droite du tuyau.

b. Écrire l'expression littérale permettant de déterminer la vitesse v du carburant dans le tuyau. En déduire sa valeur.

15 Circulation sanguine

Le sang a un débit volumique moyen d'environ 5 L $\cdot$ min^{-1} chez l'adulte.

1. a. Définir le débit volumique d'un fluide en régime permanent.

b. Exprimer la valeur du débit volumique sanguin dans l'unité du système international.

2. a. Quel volume de sang traverse chaque seconde une section de l'artère aorte de 2,5 cm^2 ?

b. À quelle vitesse le sang s'y écoule-t-il ?

3. Une artériosclérose (maladie liée à une accumulation de lipides et tissus fibreux) conduit à une diminution locale du diamètre de l'artère.

a. Le débit volumique sanguin en est-il modifié ?

b. La vitesse du sang y est-elle identique, plus importante, plus faible que dans une artère saine ? Justifier la réponse.

16 Tuyau d'arrosage

Un tuyau d'arrosage de section S_A de 25 mm de diamètre est alimenté par une pompe assurant une vitesse d'écoulement de l'eau $v_A = 1{,}7$ m $\cdot$ s^{-1}.

1. a. Calculer le débit volumique produit par la pompe. Écrire le résultat en litres par heure.

b. Quelle durée est nécessaire pour remplir un arrosoir de 12 L ?

2. L'extrémité du tuyau est pincée de sorte que sa section S_B est réduite à 2,0 cm^2. En utilisant la conservation du débit volumique, exprimer la nouvelle vitesse v_B à laquelle l'eau sort du tuyau en fonction de v_A, S_A et S_B puis calculer sa valeur.

17 Nettoyeur haute pression

On considère le nettoyeur haute pression suivant :



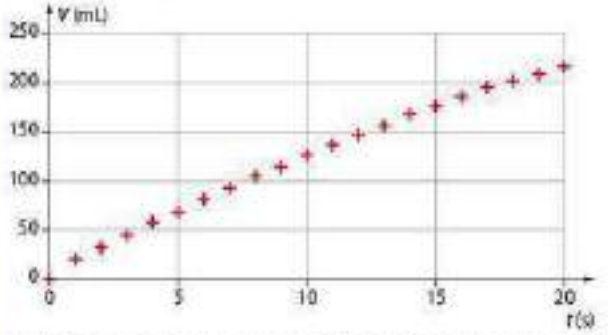
1. Quelle doit être l'aire S_A de la section de la buse pour que la vitesse v_A de l'eau en sortie soit de 125 m $\cdot$ s^{-1} ?

2. a. Traduire la conservation du débit volumique par une relation liant S_A, v_A, S_B (l'aire de la section du flexible) et v_B (la vitesse de l'eau dans le flexible).

b. En déduire la vitesse v_B.

18 Écoulement dans une bouteille percée

L'enregistrement vidéo de l'écoulement d'une solution contenue dans une bouteille de diamètre $\varnothing = 8{,}0$ cm percée à sa base a permis d'obtenir le graphique ci-dessous. Il donne les variations du volume V de solution écoulée en fonction du temps t.



1. Justifier que l'écoulement de la solution ne correspond pas à celui d'un régime permanent à partir :

a. de l'allure de la courbe ;

b. du calcul du débit volumique de la solution pour deux instants différents et judicieusement choisis de l'écoulement.

2. a. Déterminer la vitesse de la solution traversant une section de la bouteille pour ces deux instants.

b. Pourquoi la vitesse de la solution à la sortie de bouteille est-elle différente ?

3. Les réponses sont-elles en accord avec les observations faites sur l'animation suivante ?

VIDÉO

Écoulements dans une bouteille percée

Une vidéo qui montre les écoulements produits par une bouteille percée remplie d'eau.



Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

3 Relation de Bernoulli et conséquences

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Relation de Bernoulli

- Étudier l'écoulement d'un fluide.
- Exploiter et tester la relation de Bernoulli.

➥ Acquérir les bases : 19 ➥ S'entraîner : 27, 28

Effet Venturi

- Exploiter la relation de Bernoulli le long d'une ligne de courant horizontale.
- Relier la pression d'un fluide à sa vitesse d'écoulement.

➥ Acquérir les bases : 22 ➥ S'entraîner : 25

DONNÉES

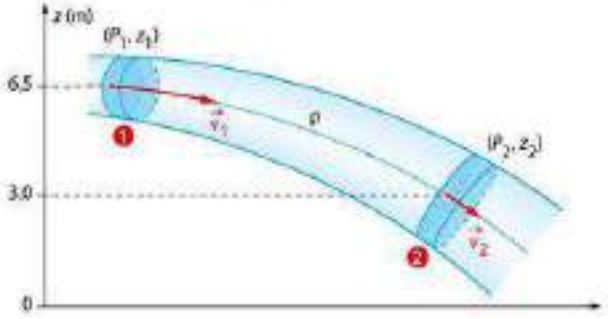
- Relation de Bernoulli :

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho \cdot g \cdot z = \text{constant} ;$$

$\rho_{eau} = 1{,}0 \times 10^3$ kg · m^{-3} ; $g = 9{,}81$ N · kg^{-1}

19 Écoulement sans frottement

On considère une quantité d'eau en écoulement entre les deux positions ❶ et ❷ situées sur une même ligne de courant et présentées sur la figure ci-dessous.



Les données sont les suivantes :

$P_1 = 1{,}0 \times 10^5$ Pa, $v_1 = 1{,}0$ m · s^{-1}, $v_2 = 4{,}5 \times 10^{-1}$ m · s^{-1}.

1. Appliquer la relation de Bernoulli à l'écoulement du fluide entre les positions ❶ et ❷.

2. En déduire l'expression littérale donnant la pression P_2 du fluide puis calculer sa valeur.

20 Analyse dimensionnelle

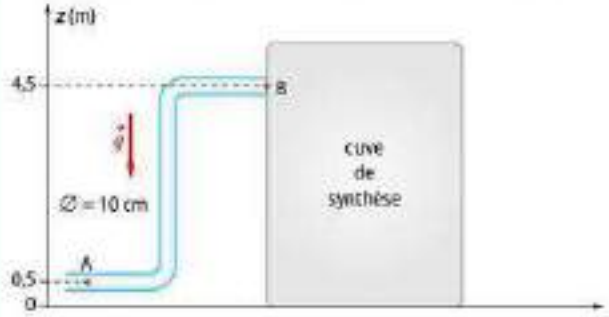
1. Décrire les différentes grandeurs physiques intervenant dans la relation de Bernoulli en indiquant leur nom et l'unité associée.

2. Montrer par une analyse dimensionnelle que les trois membres de l'égalité de la relation de Bernoulli ont la même unité que l'on précisera.

21 Chimie industrielle de synthèse

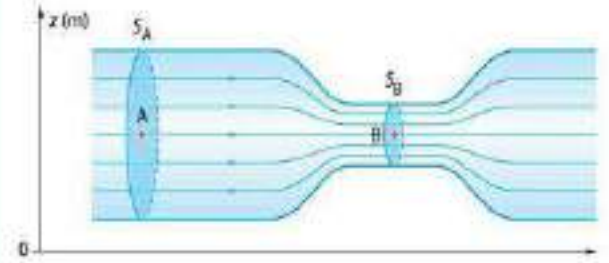
De l'acétone ($\rho = 784$ kg · m^{-3}) s'écoule du point A au point B d'une canalisation industrielle de diamètre constant avec un débit volumique de 0,75 L · s^{-1} dont l'écoulement est modélisé par le schéma ci-dessous. La pression en A vaut 3,5 bar.

Calculer la pression de l'acétone en B en appliquant la relation de Bernoulli et en détaillant les étapes du raisonnement (expressions littérales et applications numériques).



22 Rétrécissement d'un écoulement

Un fluide incompressible de masse volumique $\rho = 825$ kg · m^{-3} s'écoule dans le tube de courant suivant.



Les données sont les suivantes :

$v_A = 4{,}5$ m · s^{-1}, $P_A = 1\,002$ hPa et $P_B = 987$ hPa.

1. À travers quelle section (S_A ou S_B) la vitesse du fluide est-elle la plus élevée ? Justifier la réponse.

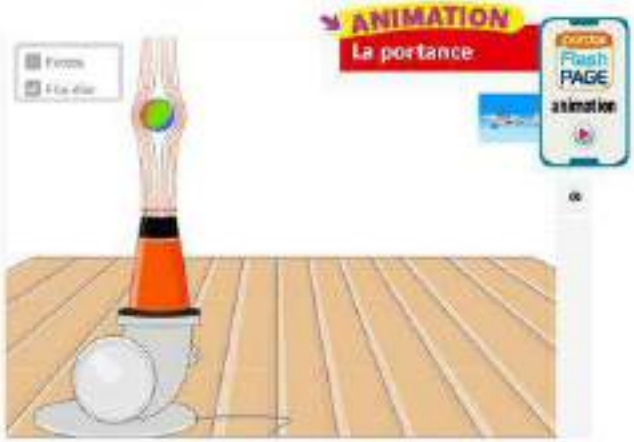
2. a. Appliquer la relation de Bernoulli entre les deux sections S_A et S_B en considérant les points A et B qui se trouvent sur la même ligne de courant.

b. En déduire la valeur de la vitesse v_B du fluide traversant la section S_B. Le résultat valide-t-il la réponse en 1 ?

23 La portance

La portance aérodynamique est une force qui modélise l'action d'un fluide sur l'aile d'un avion ou une balle en sustentation.

À l'aide de l'animation suivante, expliquer en quelques lignes l'origine de cette force.



24 Distance de sécurité en dépassement

Au cours d'un dépassement, une distance suffisante doit séparer les deux véhicules se trouvant côte à côte.

En effet, s'ils se rapprochent trop près, ils auront tendance à se happer l'un l'autre.



1. Expliquer qualitativement ce phénomène de « happement » en indiquant les variations de la vitesse et de la pression de l'air qui s'écoule entre les véhicules qui se rapprochent.

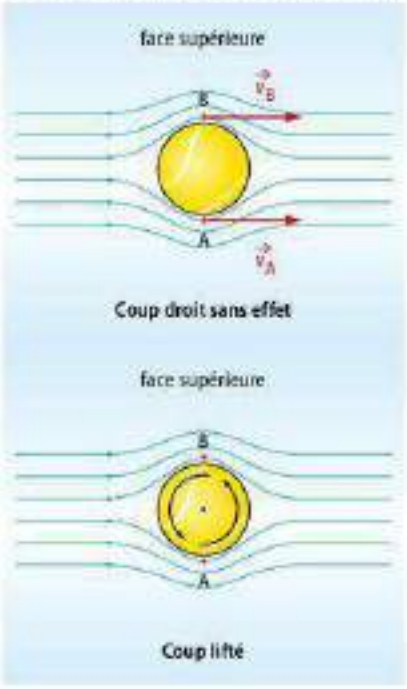
2. Comment nomme-t-on cet effet ?

25 Effet Magnus

Au tennis, lors d'un coup lifté, la rotation de la balle en mouvement dans l'air entraîne, par frottement, l'air qui se trouve à sa surface.

La vitesse de l'air par rapport au centre de la balle augmente alors d'un côté de celle-ci et diminue de l'autre.

Modélisation de l'écoulement de l'air dans le référentiel du centre de la balle sans et avec rotation de la balle autour de son centre



1. Lors d'un coup lifté, indiquer, en justifiant la réponse, la face (supérieure ou inférieure) de la balle sur laquelle :
a. l'air est le plus rapide ;
b. la pression de l'air est la plus grande.

2. a. En déduire la direction et le sens de la résultante des forces pressantes qui modélisent les actions de l'air en mouvement sur la balle.
b. Quelle en est la conséquence sur son mouvement ?

Faire le point avant d'aller plus loin

PRÉPA BAC

Pour vérifier ses connaissances, répondre aux questions suivantes (sans regarder le cours !)

- Expliquer qualitativement l'origine de la poussée d'Archimède.
- Écrire l'expression de la poussée d'Archimède en explicitant chaque grandeur et son unité.
- Définir le débit volumique d'un fluide en régime permanent.
- Nommer chaque grandeur de la relation de Bernoulli et donner son unité : $p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho \cdot g \cdot z = \text{constante}$.
- Écrire la relation liant le débit volumique d'un fluide et sa vitesse d'écoulement en explicitant chaque grandeur et son unité.
- Effectuer le bilan des actions mécaniques qui agissent sur un corps immobile immergé dans un fluide.
- Expliquer comment déterminer la vitesse d'un fluide à partir de la conservation du débit volumique en régime permanent.
- Expliquer pourquoi lors de l'écoulement d'un fluide incompressible en régime permanent si $S_B < S_A$ alors $v_B > v_A$.

Retrouver ces questions en version numérique — Cartes mémos

Exercice résolu EN AUTONOMIE

26 Ascension de Félix Baumgartner



En 2012, Félix Baumgartner s'est élevé à près de 40 km d'altitude grâce à un ballon déformable gigantesque.

Données :
- *Volume d'hélium utilisé au sol : 5 100 m^3 (soit près du double du volume nécessaire pour la sustentation (1)).*
- *Masse totale (équipage, ballon et hélium) : environ 3 tonnes.*

$\rho_{troposphère} = 1{,}2\ kg \cdot m^{-3}$ $g = 9{,}81\ N \cdot kg^{-1}$ *au niveau du sol.*

(1) Sustentation : état d'un corps maintenu au-dessus d'une surface, sans contact avec celle-ci.

1. a. Expliquer qualitativement l'origine de l'action responsable de l'ascension du ballon.

b. Illustrer par un schéma, sans souci d'échelle mais cohérent avec la situation, les forces modélisant les actions qui s'exercent sur le système (ballon + équipage) juste après le décollage, en négligeant les frottements.

2. Vérifier par un calcul que :

a. le ballon peut décoller ;

b. un volume initial d'hélium de 5 100 m^3 correspond bien au « double du nécessaire pour la sustentation ».

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- Les données indiquent la masse totale du système à prendre en compte.
- L'énoncé définit l'état de sustentation.

LES VERBES D'ACTION

- **Expliquer qualitativement** : donner une justification à une observation ou une affirmation sans faire de calcul.
- **Illustrer** : dessiner symboliquement des notions.
- **Vérifier** : Effectuer un raisonnement logique pour confirmer un résultat.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. a. La densité de l'air diminuant avec l'altitude, l'action de l'air sur le ballon est plus intense sur le bas de l'enveloppe que sur le haut. Il en résulte une **action mécanique modélisée par une force verticale et dirigée vers le haut** : la poussée d'Archimède $\vec{\pi}$.

b.



2. a. Le ballon peut décoller si la poussée d'Archimède prédomine sur la force poids : $P = m_{système} \cdot g$ et $\pi = \rho_{air} \cdot V_{ballon} \cdot g$

AN : $P = 3 \times 10^3 \times 9{,}81 = 2{,}94 \times 10^4$ N ~ $\mathbf{3 \times 10^4}$ **N**

et $\pi = 1{,}2 \times 5\,100 \times 9{,}81 = \mathbf{6{,}1 \times 10^4}$ **N.**

On constate que $\pi > P$, ainsi **le ballon peut décoller.**

b. En sustentation, le ballon est immobile et les actions se compensent :

$\pi = P$ donc $\rho_{air} \cdot V_{ballon} \cdot g = m_{système} \cdot g$ soit $V_{ballon} = \dfrac{m_{système}}{\rho_{air}}$.

AN : $V_{ballon} = \dfrac{3 \times 10^3}{1{,}2} = \mathbf{2\,500\ m^3}$, valeur près de deux fois plus faible que 5 100 m^3.

QUELQUES CONSEILS

1. b. Penser que la nature d'un mouvement informe sur les forces exercées.

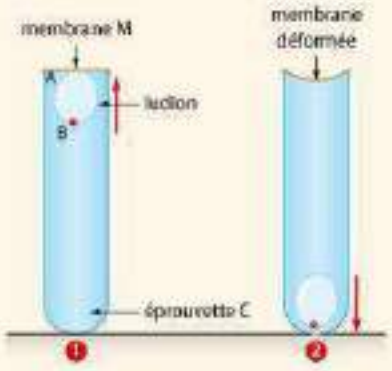
2. a. La masse du système est donnée en tonnes et avec un seul chiffre significatif.

b. Simplifier l'expression littérale du volume V_{ballon} du ballon donne accès à un calcul simple.

EXERCICE SIMILAIRE

27 Le ludion

Un ludion est réalisé à l'aide d'une bille (B) de volume V_B, placée dans un ballon de baudruche (A) fermé et imperméable, renfermant de l'air de volume variable V_A. Placé dans une éprouvette (C), remplie d'eau et fermée par une membrane souple (M), il est en équilibre à la surface de l'eau ❶. Lorsque l'on appuie sur la membrane, la pression de l'eau sur l'air enfermé dans le ludion augmente : il tombe au fond de l'éprouvette ❷.



Données : *masse du ludion $m_L = 6{,}8$ g ; $V_B = 1{,}8\ cm^3$; $\rho_{eau} = 1\,000\ kg \cdot m^{-3}$; $g = 9{,}8\ m \cdot s^{-2}$. L'eau est supposée incompressible.*

1. a. Établir l'expression littérale du volume d'air V_A dans le ballon en fonction de m_L, ρ_{eau} et V_B lorsque le ludion est en équilibre.

b. Calculer sa valeur.

2. a. Indiquer comment évolue le volume d'air contenu dans le ludion après compression de la membrane.

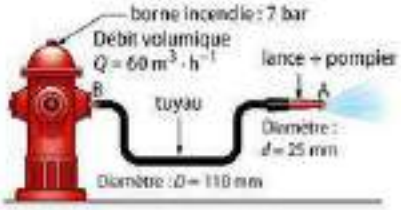
b. Expliquer alors qualitativement que le ludion entame un mouvement vertical vers le bas. Illustrer la situation par un schéma, sans souci d'échelle mais avec cohérence.

Exercice résolu EN AUTONOMIE

28 Lance à incendie

On considère la situation représentée par le schéma ci-contre.

Données : $P_{atm} = 1\,013$ hPa ;
$\rho_{eau} = 1\,000$ kg · m^{-3} ; *relation de Bernoulli :*
$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho \cdot g \cdot z = \text{constante}$.



1. a. Calculer, à partir du débit volumique, la valeur de la vitesse v_B de l'eau à la sortie de la borne incendie.
b. **Appliquer** la conservation du débit volumique à l'écoulement pour la vitesse v_A de l'eau éjectée en sortie de lance.

2. a. **Appliquer** la relation de Bernoulli entre les points A et B situés sur une même ligne de courant.
b. **En déduire** la valeur de la pression P_B de l'eau à la sortie de la borne et la **comparer** à celle de l'énoncé.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. a. $Q = 60\ m^3 \cdot h^{-1} = 1{,}7 \times 10^{-2}\ m^3 \cdot s^{-1}$ et $S_B = \pi \cdot \frac{0{,}110^2}{4} = 9{,}5 \times 10^{-3}\ m^2$.

$Q = v_B \cdot S_B$ soit $v_B = \frac{Q}{S_B}$. **AN :** $v_B = \frac{1{,}7 \times 10^{-2}}{9{,}5 \times 10^{-3}} = \mathbf{1{,}8\ m \cdot s^{-1}}$.

b. $v_A \cdot S_A = v_B \cdot S_B$ soit $v_A = v_B \cdot \frac{S_B}{S_A}$. **AN :** $v_A = 1{,}8 \times \frac{9{,}5 \times 10^{-3}}{\pi \cdot \frac{0{,}025^2}{4}} = \mathbf{35\ m \cdot s^{-1}}$.

2. a. $P_B + \frac{1}{2}\rho \cdot v_B^2 + \rho \cdot g \cdot z_B = P_A + \frac{1}{2}\rho \cdot v_A^2 + \rho \cdot g \cdot z_A$.

$P_A = P_{atm}$ et $z_B = z_A$ donc la relation de Bernoulli s'écrit :

$$\mathbf{P_B + \frac{1}{2}\rho_{eau} \cdot v_B^2 = P_{atm} + \frac{1}{2}\rho_{eau} \cdot v_A^2}$$

b. $P_B = P_{atm} + \frac{1}{2}\rho_{eau} \cdot (v_A^2 - v_B^2)$

AN : $P_B = 1{,}013 \times 10^5 + \frac{1}{2} \times 1000 \times (35^2 - 1{,}8^2) = \mathbf{7{,}1 \times 10^5\ Pa = 7\ bar}$

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- La valeur du débit volumique est précisée dans l'énoncé.
- Les données fournissent la relation de Bernoulli dans le cas général d'un écoulement permanent.

LES VERBES D'ACTION

- **Appliquer :** adapter une relation, une notion à une situation particulière en tenant compte des informations fournies.
- **En déduire :** intégrer le ou les résultats précédents pour répondre.
- **Comparer :** mettre en regard deux résultats pour en identifier les différences ou les similitudes.

QUELQUES CONSEILS

1. b. Penser à convertir le débit volumique en $m^3 \cdot s^{-1}$ et le diamètre en m. La formule de l'aire d'un disque est indispensable.

2. a. Identifier dans l'énoncé les informations permettant de simplifier la relation de Bernoulli.

2. b. Utiliser les bonnes unités et s'assurer du résultat en réalisant deux fois le calcul.

EXERCICE SIMILAIRE

29 Fontaine à eau

La tuyère d'une fontaine à eau est alimentée par une pompe assurant un débit d'un mètre cube par minute. Le diamètre de la canalisation d'alimentation est de 80 mm et celui de l'orifice de la tuyère est de 25 mm. Orientée verticalement, le jet d'eau expulsé atteint une hauteur h.

Données : *à la sortie de la tuyère, l'eau éjectée est en contact avec de l'air à la pression atmosphérique,* $P_{atm} = 1\,013$ hPa ; $g = 9{,}8\ m \cdot s^{-2}$;

relation de Bernoulli : $P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho \cdot g \cdot z = \text{constante}$.

1. a. Calculer la valeur de la vitesse v_A d'éjection de l'eau à la sortie de la tuyère. Expliquer qualitativement pourquoi cette valeur est supérieure à celle de l'eau dans la canalisation.
b. Quelle est la valeur de la pression et de la vitesse de l'eau au sommet du jet ?

2. a. Appliquer la relation de Bernoulli entre un point de l'orifice de la tuyère et un point du sommet du jet situés tous deux sur une même ligne de courant.
b. En déduire l'expression littérale de la hauteur h du jet d'eau en fonction de v_A et g puis calculer sa valeur.
c. Pourquoi la hauteur réelle du jet est plus faible que la valeur calculée ?
d. Quelle modification de la tuyère permettrait d'augmenter la hauteur du jet ?



Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

S'entraîner pour maîtriser

DONNÉES

- $g = 9{,}8\ \text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\rho_{eau} = 998\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ à 20 °C.
- Relation de Bernoulli : $P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho \cdot g \cdot z = \text{constante}$.

SAVOIR RÉDIGER

30 Proposer une correction de la solution proposée par un élève à l'énoncé.

Énoncé

Un plongeur possède une masse $m = 85$ kg et un volume $V = 90$ L (équipement compris).

1. a. Calculer la valeur P du poids du plongeur et π de la poussée d'Archimède lorsqu'il est entièrement immergé.
b. Quelle est l'origine de ces actions ?
c. Le plongeur parvient-il à se maintenir en surface ? Si oui, indiquer la valeur du volume réellement immergé.

2. Surlesté en fin de plongée il ne peut pas se maintenir à une profondeur constante. Sa masse est alors de 92 kg. Quel volume d'air doit-il introduire dans son gilet pour obtenir une flottabilité positive et remonter vers la surface ?

Solution proposée par un élève

1. a. $P = 85 \times 9{,}8 = 833$ N et $\pi = 998 \times 0{,}090 \times 9{,}8 = 880$ N) Attention au nombre de chiffres significatifs utilisés
b. Le fluide est à l'origine de ces actions) Réponse à développer
c. $\pi > P$ donc il se maintient en surface $V_{immergé} = \pi / \rho \cdot g = 880/(998 \times 9{,}8) = 90$ L) Corriger la valeur de π utilisée
2. Pour $\pi = P$ dans $V_{immergé} = m \cdot g/\rho \cdot g = m/\rho = 92/998 = 9{,}2 \times 10^{-2}\ \text{m}^3 = 92$ L) Revoir la condition de mise en mouvement
Il doit introduire 92 L d'air dans son gilet.

31 Stockage de l'eau à New York



Un réservoir situé sur le toit d'un immeuble permet d'alimenter en eau les appartements situés en dessous avec une pression suffisante. Dans le réservoir d'une section $S_A = 10\ \text{m}^2$, l'eau est stockée sur une hauteur de 5,5 m. L'écoulement s'effectue par une canalisation de section $S_B = 7{,}0 \times 10^{-2}\ \text{m}^2$ située à la base du réservoir.

Donnée : au sommet du réservoir comme à la sortie de la canalisation, l'eau est en contact avec l'air à la pression atmosphérique.

1. a. Exploiter la conservation du débit volumique pour exprimer la vitesse v_B de l'eau à la sortie de la canalisation en fonction de S_A, S_B et v_A, la vitesse de l'eau à la surface libre du réservoir.
b. En déduire que la vitesse v_A peut être négligée par rapport à v_B et considérée comme quasiment nulle.

2. a. Appliquer la relation de Bernoulli entre un point A de la surface libre de l'eau dans le réservoir et un point B de la canalisation de sortie (on suppose que A et B sont sur la même ligne de courant).
b. En déduire que la vitesse v_B est donnée par l'expression littérale $v_B = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$ puis déterminer sa valeur.
c. Calculer le débit volumique de l'eau dans la canalisation.

Coups de pouce

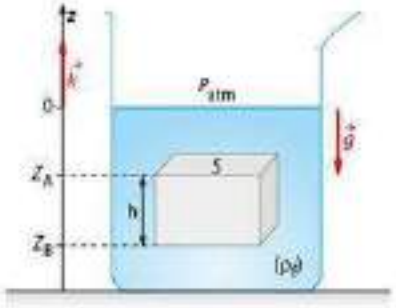
- Penser à utiliser les bonnes unités
- La donnée et la question 1. b. apportent des informations permettant de simplifier la relation de Bernoulli

32 Origine de la poussée d'Archimède

DÉMARCHES DIFFÉRENCIÉES

On considère un cube de hauteur h, plongé dans un fluide de masse volumique ρ_f. $\vec{g}$, P_{atm}, S et V désignant respectivement le champ de pesanteur terrestre, la pression atmosphérique, l'aire d'une face du cube et son volume.

Un axe des altitudes (Oz) de vecteur unitaire $\vec{k}$ est dirigé vers le haut.



DÉMARCHE EXPERTE

À partir d'un raisonnement mettant en jeu la loi fondamentale de la statique des fluides et la notion de force pressante, vérifier l'expression vectorielle (direction, sens et valeur) de la poussée d'Archimède qui modélise les actions mécaniques agissant sur un cube immergé dans un fluide.

DÉMARCHE AVANCÉE

1. a. Représenter sur un schéma, sans souci d'échelle mais cohérent avec la situation, les forces pressantes $\vec{F}_A$ et $\vec{F}_B$ qui modélisent les actions mécaniques du fluide sur les surfaces supérieure et inférieure du cube.
b. Pourquoi les actions mécaniques du fluide sur les surfaces latérales du cube se compensent-elles ?

2. a. Exprimer $(F_B - F_A)$ en fonction de la différence de pression $(P_B - P_A)$ puis en fonction de ρ_f, h et g.
b. En déduire l'expression vectorielle $\Sigma\vec{F}$ de la résultante des forces qui modélisent les actions du fluide sur le cube. La comparer à celle du poids $\vec{P}$ d'un volume de fluide égal à celui du cube (donc à celui déplacé par le cube immergé). Conclure.

33 Helium balloon

A meteorological balloon inflated with helium must embark in the atmosphere a set of sensors with a mass of 500 g.

Data : $M_{He} = 4,0\ g \cdot mol^{-1}$, $M_O = 16,0\ g \cdot mol^{-1}$, $M_N = 14,0\ g \cdot mol^{-1}$, air composition : dinitrogen 80% – dioxygen 20%, $V_M = 22,4\ L \cdot mol^{-1}$.

1. Calculate the density of helium and the density of air.

2. What should be the minimum volume of the balloon befor it to rise?

34 Le thermomètre de Galilée



Galilée s'est intéressé au phénomène de flottabilité et à la mesure de densité. Il est à l'origine d'un thermomètre dont le fonctionnement provient du fait que la masse volumique d'un liquide décroît fortement lorsque la température augmente.

On modélise un thermomètre de Galilée à l'aide d'une éprouvette remplie d'eau contenant deux sphères A et B de même volume V et de masse m_A et m_B différentes. À $T = 24$ °C, la sphère A, complètement immergée, est en équilibre dans le liquide. À $T = 22$ °C, c'est la sphère B. On note ρ_A et ρ_B les masses volumiques des sphères A et B.

Données : ρ_{eau} vaut 997,38 kg · m^{-3} à 24 °C et 997,86 kg · m^{-3} à 22 °C ; $V = 2$ mL et est indépendant de la température ; $g = 9,8\ N \cdot kg^{-1}$ et $\vec{k}$ est un vecteur unitaire.

1. a. Faire un bilan des actions mécaniques qui agissent sur la sphère A. Les représenter sur un schéma (sans souci d'échelle) et donner leur expression en fonction de ρ_{eau}, ρ_A, V, g et $\vec{k}$.
b. Déterminer la valeur de la masse volumique ρ_A de la sphère A.
c. Lorsque la température s'élève au-dessus de 24 °C, la sphère A se met en mouvement. Justifier dans quel sens.

2. a. Expliquer qu'à 24 °C la sphère B reste en bas de l'éprouvette.
b. Pour quelles températures s'élèvera-t-elle ?

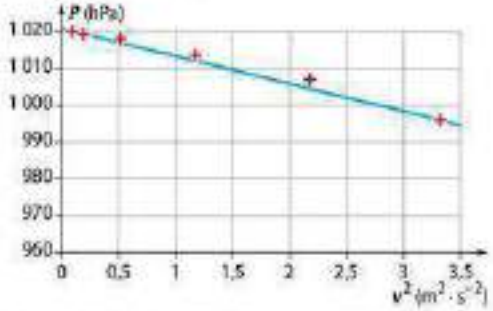


3. a. Calculer en milligramme la différence de masse $\Delta m = m_B - m_A$ des sphères A et B. En déduire l'intérêt d'utiliser un liquide autre que l'eau (généralement une huile minérale) pour remplir la colonne d'un thermomètre de Galilée.
b. Lire sur le thermomètre de Galilée ci-contre la température mesurée. Écrire le résultat de la mesure accompagnée de son incertitude-type.

35 VMC TABLEUR-GRAPHEUR

1. Toutes les 10 minutes, une VMC (ventilation mécanique contrôlée) recycle l'air d'une pièce de 25 m^3. Calculer la vitesse de l'air traversant une section de la gaine de 200 mm de diamètre intérieur ?

2. Au moyen d'un capteur de pression relié à un microcontrôleur, on enregistre la pression de l'air qui s'écoule dans des gaines horizontales de différentes sections. On obtient le graphe suivant.



a. Quel type de fonction choisir pour modéliser ces mesures ?
b. À quoi correspond l'ordonnée à l'origine ? Donner sa valeur.
c. L'évolution constatée expérimentalement est-elle en accord avec le modèle de Bernoulli ?

À L'ORAL

36 Plongée d'un sous-marin

Élaborer un exposé oral permettant d'expliquer l'animation suivante.



Les mots-clés à utiliser
- masse volumique
- poussée d'Archimède
- poids
- résultante de forces
- mouvement

37 RETOUR SUR LA PAGE D'OUVERTURE

Dans le sport automobile, l'effet de sol est mis à profit pour accroître l'adhérence des véhicules au circuit et les « coller » à la piste.

Préparer un exposé oral qui explique ce phénomène aérodynamique.



Développer ses compétences

38 Décollage d'une montgolfière RÉSOLUTION DE PROBLÈME

50 min

(AN/RAI) Proposer une stratégie de résolution

Les déplacements verticaux d'une montgolfière sont assurés par le chauffage de l'air qu'elle renferme au moyen d'un brûleur et de réserves en carburant.

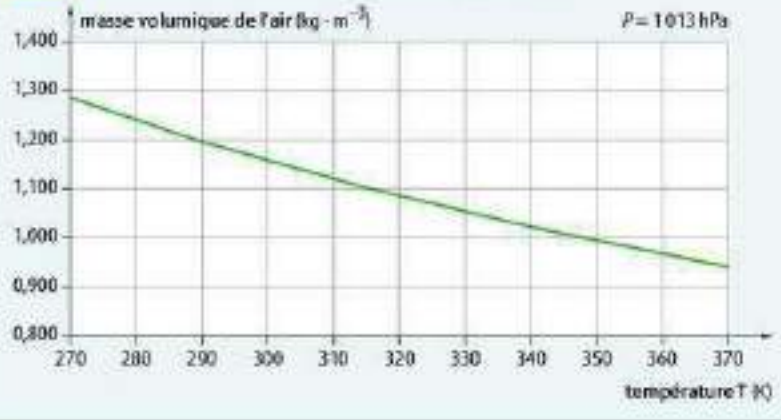
DOC 1 Les caractéristiques de la montgolfière



DOC 3 Météo du jour



DOC 2 Masse volumique de l'air et température



DONNÉES

- Intensité du champ de pesanteur : $g = 9{,}81\ \text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$
- $T(\text{en K}) = T(\text{en °C}) + 273{,}15$
- Volume d'une sphère de rayon R : $V = \frac{4}{3}\pi R^3$
- Expression vectorielle de la poussée d'Archimède : $\vec{\Pi} = -\rho_f \cdot V \cdot \vec{g}$

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Donner une estimation cohérente du volume du ballon de la montgolfière photographiée sur le doc. 1.
2. Modéliser sur un schéma, sans souci d'échelle mais avec cohérence, les actions mécaniques qui agissent sur le ballon lors du décollage.
3. Quelle est la valeur de la masse volumique de l'air extérieur au ballon ?

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

Quelle doit être la valeur minimale de la température de l'air contenu dans le ballon d'une montgolfière pour permettre son décollage ?

Il est attendu une prise d'initiatives et une présentation de la démarche suivie même s'il elle n'a pas abouti.

À la date de publication de ce manuel, les notions enseignées dans ce chapitre sont exclues de l'épreuve écrite.

39 La fusée à eau

RÉSOLUTION DE PROBLÈME

50 min

REA Utiliser un modèle

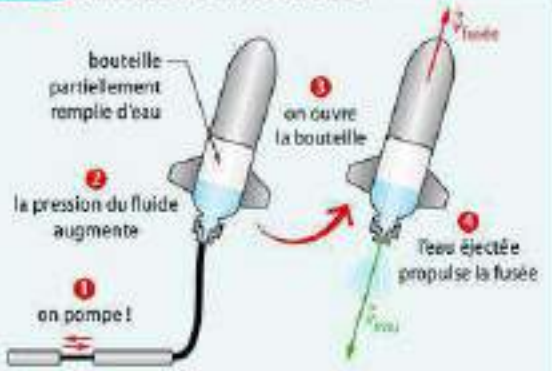
Une fusée à eau utilise un écoulement d'eau et d'air sous pression pour être propulsée par réaction. Lorsque l'eau est éjectée du réservoir de la fusée, une force de réaction créée dans le sens opposé génère une vitesse pouvant atteindre plusieurs kilomètres par heure.



DONNÉES

- Intensité du champ de pesanteur : $g = 9{,}81\ \text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$
- Masse volumique de l'eau : $\rho = 1\,000\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- $P_{atm} = 1\,000$ hPa

DOC 1 Principe de la fusée à eau



À l'ouverture, l'écoulement du fluide contenu dans la bouteille (l'eau dans un premier temps) produit une poussée suffisamment intense pour propulser la fusée en sens opposé. Cette action du fluide éjecté peut être modélisée par une force dont la valeur, maximale à l'ouverture, est l'équivalent du double de la force pressante modélisant l'action de l'eau sur la surface de la tuyère. Par la suite, le réservoir se vide progressivement, la pression diminue ainsi que la poussée.

Tout au long de son mouvement, la vitesse de la fusée est liée à la vitesse du fluide éjecté :

$$\vec{v}_{\text{fusée}} = -\frac{m_{\text{fluide éjecté}}}{m_{\text{fusée}}}\vec{v}_{\text{fluide éjecté}}$$

DOC 2 Des lois de la mécanique des fluides

• Loi fondamentale de la statique des fluides

Entre n'importe quels points A et B d'un liquide au repos :

$$P_B - P_A = \rho \cdot g \cdot (z_A - z_B)$$

• Relation de Bernoulli

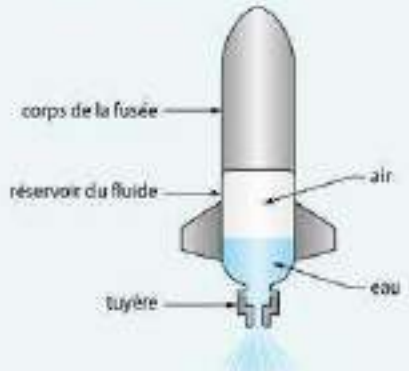
Pour n'importe quels points A et B situés sur une même ligne de courant :

$$P_A + \frac{1}{2}\rho \cdot v_A^2 + \rho \cdot g \cdot z_A = P_B + \frac{1}{2}\rho \cdot v_B^2 + \rho \cdot g \cdot z_B$$

P, ρ, z et v désignent respectivement la pression, la masse volumique, l'altitude et la vitesse du fluide et g est l'intensité du champ de pesanteur. Leurs valeurs doivent être exprimées dans les unités du système international.

DOC 3 Quelques caractéristiques de la fusée

- Masse à vide : 100 g
- Diamètre du corps : 8,5 cm
- Diamètre de la tuyère : 2,0 cm
- Volume total : 1,5 L
- Hauteur totale : 40 cm
- Hauteur d'eau dans le réservoir : 10 cm
- Pression de l'air intérieur : 6,0 bar



QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Montrer qu'à l'instant du décollage la force de poussée de la fusée à eau est suffisamment importante pour assurer son décollage.

2. Appliquer la conservation du débit volumique pour montrer que l'écoulement de l'eau dans le réservoir s'effectue à une vitesse négligeable devant celle de l'éjection par la tuyère.

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

Quelle vitesse atteint la fusée à eau dix millisecondes après son décollage ?

Il est attendu une prise d'initiatives et une présentation de la démarche suivie même s'il elle n'a pas abouti.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique.

À la date de publication de ce manuel, les notions enseignées dans ce chapitre sont exclues de l'épreuve écrite.

Retrouvez des exercices de synthèse p. 364

PRÉPA BAC

40 Anévrisme de l'aorte SVT

RÉSOLUTION DE PROBLÈME

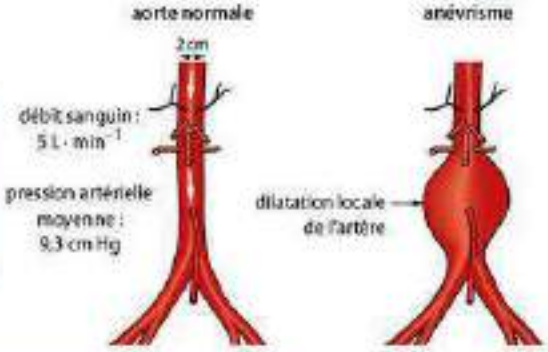
30 min

AN/RAI Faire des prévisions à l'aide d'un modèle

Diagnostiqué par échographie doppler, un anévrisme modifie les caractéristiques de l'écoulement sanguin.

DONNÉES

- 1,0 mm Hg = 133,3 Pa ; $\rho_{sang} = 1061\,kg \cdot m^{-3}$, $g = 9{,}81\,N \cdot kg^{-1}$
- Relation de Bernoulli : $P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho \cdot g \cdot z = \text{constante}$



QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

Quel est l'effet de l'augmentation du diamètre de l'artère aorte sur :

a. le débit volumique sanguin ;

b. la vitesse d'écoulement du sang dans l'artère aorte ;

c. la pression sanguine au niveau de l'anévrisme.

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

Estimer à partir de la figure ci-dessus les nouvelles valeurs de chacune des grandeurs modifiées suite à un anévrisme.

VERS LE SUP'

41 La sonde de Pitot

En aéronautique, la vitesse aérodynamique des appareils est calculée au moyen de sondes de Pitot.

DONNÉES

- À une altitude de 10 km, un avion de ligne se déplace à une vitesse aérodynamique d'environ 800 km · h⁻¹, ρ_{air} = 0,413 kg · m⁻³ et $g = 9{,}78\,N \cdot kg^{-1}$, $\rho_{eau} = 998{,}29\,kg \cdot m^{-3}$ à 20 °C.
- Une sonde de Pitot étant fine, la différence d'altitude entre les points A et B est négligeable.
- La vitesse v de l'air a la même valeur en tout point d'une section droite d'un tube de courant.

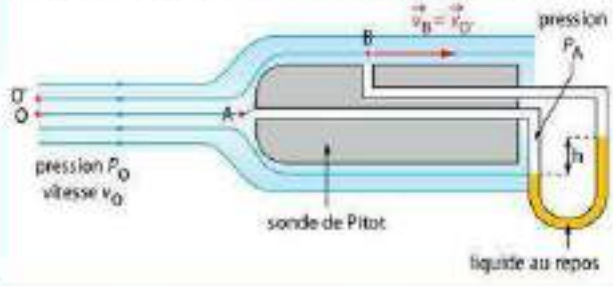


DOC Principe de fonctionnement

Une sonde de Pitot est un dispositif constitué d'un double tube fin placé parallèlement à l'écoulement du fluide. Ses extrémités sont reliées à un manomètre et ses orifices (A et B) sont disposés de façon spécifique.

La prise axiale A capte la pression statique P_A du fluide : la ligne de courant issue du point O situé sur l'axe du tube vient s'arrêter au point A. La pression P_A mesurée correspond à celle du fluide immobile par rapport au tube.

La prise latérale B capte la pression dynamique P_B du fluide : la ligne de courant issue d'un point O' très proche de O effleure le tube en passant par le point B à la vitesse v_B.



La vitesse du fluide en B étant supérieure à celle en A (A est un point d'arrêt du fluide), alors P_B est inférieure P_A. La différence de pression $(P_A - P_B)$ entre les deux prises de mesure est directement liée à la vitesse v_0 du fluide en écoulement autour de la sonde.

Des manomètres différentiels sont utilisés pour mesurer cet écart de pression. Pour des avions de ligne en vol, cet écart est équivalent dans un tube en U rempli d'eau à une dénivellation h de l'ordre d'un mètre.

1. a. Appliquer la relation de Bernoulli aux lignes de courant O'B et OA pour établir une relation entre P_B et P_0 et une relation liant P_A, P_0, ρ_{air} et v_0.

b. En déduire l'expression littérale liant la vitesse v_0, la différence de pression $(P_A - P_B)$ et ρ_{air}.

2. Exprimer $(P_A - P_B)$ en fonction de h, à l'aide de la loi fondamentale de la statique des fluides.

3. Déterminer la valeur de la vitesse aérodynamique calculée pour un appareil en vol.

À la date de publication de ce manuel, cette capacité expérimentale est exclue de l'épreuve pratique.

Ascension d'un ballon sonde

Contexte

L'objectif de cette activité est de tester l'expression de la poussée d'Archimède modélisant l'action de l'air sur un ballon sonde à partir de la vidéo de son décollage.

Documents mis à disposition

DOC 1 Expression vectorielle de la poussée d'Archimède

« Tout corps immergé dans un fluide subit, de la part de ce fluide, des actions mécaniques modélisées par une force $\vec{\pi}$ verticale dirigée vers le haut et de valeur égale au poids du volume de fluide déplacé $\vec{\pi} = \rho \cdot V \cdot g \cdot \vec{u}_z$ ».

Avec :

- ρ la masse volumique du fluide déplacé ;
- V le volume de fluide déplacé ;
- g l'intensité de pesanteur au lieu considéré. À la surface de la Terre, $g = 9{,}8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$;
- $\vec{u}_z$ le vecteur unitaire d'un axe vertical (Oz) est orienté vers le haut.

DOC 2 Décollage d'un ballon sonde et dimensions du système

La mise en mouvement d'un ballon sonde est assurée par la poussée d'Archimède qui modélise l'action de l'air ($\rho_{air} = 1{,}2\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) sur le ballon. Tant que sa valeur l'emporte (sur son poids et les frottements de l'air), le mouvement est accéléré. C'est le cas lors des premiers instants du décollage où la vitesse du ballon est faible et les frottements négligeables. Par la suite, l'ascension s'effectue à vitesse constante.

Le ballon sonde est assimilable à une sphère de rayon moyen $R = 10{,}0$ cm et de volume $V = 4{,}2$ L.



DOC 3 Bilan des actions mécaniques

En phase de décollage sans frottement, le système (ballon + sondes) est modélisé par le point matériel M et étudié dans un référentiel terrestre considéré comme galiléen. L'application de la seconde loi de Newton amène l'expression suivante : $\pi = m(a + g)$

- π la valeur de la poussée d'Archimède ;
- m la masse du système : $m = 4{,}7$ g avec une incertitude-type associée $u(m) = 0{,}1$ g ;
- a la valeur de l'accélération du point M qui modélise le ballon.

Matériel mis à disposition

- Une calculette type « collège » ou un ordinateur avec fonction « calculatrice »
- Un ordinateur
- Un logiciel lecteur de vidéos
- Un logiciel de pointage et un logiciel tableur-grapheur accompagné d'une notice d'utilisation simplifiée
- Une vidéo « décollage d'un ballon sonde » montrant le décollage d'un ballon sonde

Travail à effectuer

1. (ANA) (RAI) **Proposition de protocole expérimental** *(20 min conseillées)*

- Visionner la vidéo intitulée « décollage d'un ballon sonde ».
- En utilisant les documents et le matériel mis à disposition, proposer un protocole expérimental permettant de déterminer la valeur de l'accélération du ballon lors de sa mise en mouvement.

Être en mesure de présenter le protocole

2. (RÉA) **Mise en œuvre du protocole expérimental proposé** *(20 min conseillées)*

- Mettre en œuvre le protocole précédemment validé.

Mettre en œuvre le protocole proposé.

- Indiquer la valeur de l'accélération a du ballon déterminée expérimentalement accompagnée de son incertitude type u_a.

3. (RÉA) (VAL) **Exploitation du résultat obtenu** *(20 min conseillées)*

1. Calculer la valeur π de la poussée d'Archimède (accompagnée de son incertitude type u_π) à partir de l'accélération déterminée précédemment et des valeurs fournies.

On donne : $\dfrac{u(\pi)}{\pi} = \sqrt{\left(\dfrac{u(m)}{m}\right)^2 + \left(\dfrac{u(a)}{a}\right)^2}$

2. Comparer cette valeur avec celle donnée par l'expression vectorielle.
3. Commenter le résultat obtenu en portant un regard critique sur la méthode employée.

Fermer les logiciels et ranger la paillasse avant de quitter la salle.

PISTE POUR LE GRAND ORAL PRÉPA BAC

Pour se préparer à l'Oral
➥ Livret LES CLÉS DU BAC
(en début de manuel)

UNE QUESTION

Un projet de taxis « volants » au-dessus de l'eau est-il réaliste ?

Enjeu de la question

De nouvelles embarcations pourraient naviguer à une vitesse supérieure en moyenne à celle des véhicules routiers. Un moyen de désengorger les centres villes de manière écologique : zéro émission de CO_2, zéro bruit, zéro vague.

Exemple de support de présentation



Projet de taxis électriques sur la Seine

Proposition de plan de présentation

1. Modélisation des actions exercées sur un bateau : poids, poussée d'Archimède, propulsion, trainée.
2. Inconvénients et limites des embarcations « classiques ». Des solutions envisageables : augmenter la puissance de propulsion, réduire la résistance à l'avancement.
3. Principe de fonctionnement d'un foil et avantage hydrodynamique.
4. Conclusion : applications aux taxis flottants, avantages et limites du projet

Les mots-clés

poussée d'Archimède ▸ relation de Bernoulli ▸ effet venturi ▸ pression ▸ écoulement ▸ vitesse d'un fluide

QUESTIONS D'APPROFONDISSEMENT POSSIBLES



UN EXEMPLE DE PROJET PROFESSIONNEL

Après le bac : *bac + 5 diplôme d'ingénieur ou master spécialisé en aéronautique, aérodynamisme ou mécanique des fluides.*

Autres métiers : *ingénieur(e) d'étude et de développement de logiciel de simulation, ingénieur(e) et techniciens d'essais, ingénieur·e concepteur(trice) en mécanique.*

Le développement de moyens de transport à la fois rapides et économes en énergie devient une nécessité. Dans de nombreux secteurs, comme l'aéronautique, l'automobile, la construction navale, l'architecture des bâtiments, des métiers relatifs à l'aérodynamisme et l'hydrodynamisme sont essentiels, aussi bien à des postes d'ingénieurs que de techniciens.

L'ingénieur **aérodynamicien** est chargé d'étudier les propriétés aérodynamiques d'un projet. Il analyse sa résistance à l'air, utilise des simulations informatiques, réalise des prototypes et effectue des tests afin de proposer des améliorations et permettre un développement du projet à plus grande échelle.



Exercice résolu EN AUTONOMIE

20 min

1 Saturne, ses satellites, ses anneaux

Satellites	Durée de révolution			Rayon de l'orbite (milliers de km)
Janus		17 h	58 min	159
Mimas		22 h	37 min	185,8
Encelade	1 j	8 h	53 min	238,3
Tethis	1 j	21 h	18 min	294,9
Dione	2 j	17 h	41 min	377,9

FIG 1 Données relatives aux satellites de Saturne

La planète Saturne est entourée de nombreux satellites et d'anneaux. Les anneaux sont formés de divers éléments (cailloux, poussières et blocs de glace).

Donnée : *constante de gravitation universelle* $G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$.

1. Pour étudier le mouvement des satellites de Saturne il convient de se placer dans un référentiel particulier que l'on peut appeler « saturnocentrique » par analogie à « géocentrique ». Comment définir le référentiel « saturnocentrique » ?

2. À partir d'un bilan de forces modélisant les actions mécaniques exercées sur un satellite de Saturne (on néglige l'action des autres astres), démontrer la relation $v^2 = GM_s / r$ qui relie la vitesse v du satellite, le rayon r de son orbite, la masse de Saturne M_s et la constante de gravitation universelle G.

3. La troisième loi de Képler peut s'énoncer ainsi : « Le carré de la période de révolution d'un satellite d'un astre est proportionnel au cube du rayon de sa trajectoire circulaire, soit : $T^2 = k \cdot r^3$ ».

Déterminer à partir du résultat de la question 2., l'expression de la constante de proportionnalité k en fonction de M_s et G.

4. En utilisant les données relatives à l'un des satellites, déduire la masse de Saturne.

5. On néglige l'action des éléments les uns sur les autres devant l'action de l'astre sur chacun des éléments ; A et B étant deux éléments de deux anneaux différents initialement alignés avec Saturne, cet alignement sera-t-il conservé ? On justifiera la réponse.



FIG 2 La planète Saturne

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. Le référentiel « saturnocentrique » a pour origine le centre de Saturne et ses axes sont dirigés vers trois étoiles fixes.

2. On se place dans le référentiel « saturnocentrique » que l'on considère comme galiléen.

La seule action mécanique qui s'exerce sur le satellite est l'action de Saturne que l'on modélise par le force de gravitation $\vec{F}$.

D'après la seconde loi de Newton, on peut écrire que :

$$m \cdot \vec{a} = \vec{F}$$

En projetant dans le repère de Fresnel, on peut écrire que $m \cdot v^2 / r = G \cdot M_s \cdot m / r^2$.

Donc $v^2 = GM_s / r$.

3. La période de révolution T est la durée mis par le satellite pour faire un tour complet sur son orbite donc on peut écrire que : $T = 2 \cdot \pi \cdot r / v$.

Donc $T^2 = 4 \cdot \pi^2 / v^2 = 4 \cdot \pi^2 \cdot (r^3 / G \cdot M_s)$.

Et donc on a bien $T^2 = k \cdot r^3$ avec $k = 4 \cdot \pi^2 / G \cdot M_s$.

4. Comme $T^2 = 4 \cdot \pi^2 \cdot (r^3 / G \cdot M_s)$,
on a $M_s = 4 \cdot \pi^2 \cdot r^3 / (G \cdot T^2)$.

On peut par exemple utiliser les données concernant le satellite Janus :

$r = 159 \times 10^6$ m

$T = 17$ h 58 min $= 64\,680$ s

$M_s = 4 \cdot \pi^2 \cdot (159 \times 10^6)^3 / (6{,}67 \times 10^{-11} \times 64\,680^2)$
$= 5{,}73 \times 10^{26}$ kg.

5. $r_A \neq r_B$ donc comme d'après la troisième loi de Képler on a $T^2 = k \cdot r^3$, on $T_A \neq T_B$ donc leur période sera différente donc ils ne resteront pas alignés.

Exercice guidé EN AUTONOMIE

THÈME 2

40 min

2 Le curling

On peut lire dans une revue sportive la définition suivante :

« Curling : jeu écossais qui remonte au XVI[e] siècle. On y joue sur patinoire horizontale ; il s'agit d'atteindre un but circulaire (cible dessinée sur le sol) avec un palet de pierre, muni d'une poignée, que l'on fait glisser sur la glace. Le palet "pèse" 20 kg. Le curling se joue entre équipe de quatre. Quand le joueur tire, deux de ses partenaires peuvent balayer la glace devant le palet pour en faciliter le glissement. Chaque joueur lance deux palets. »





Le mouvement du palet sera étudié dans le référentiel terrestre supposé galiléen.

1. Dans cette question les forces de frottement sont négligées.

Un joueur pousse le palet pendant 3,0 s avec une force $\vec{F}$ constante, suivant une trajectoire rectiligne, le faisant passer de l'immobilité à la vitesse de lancement v_L ($v_L = 2{,}1\ m \cdot s^{-1}$). Ensuite le palet poursuit sa trajectoire sur la glace.

a. Montrer que, pendant la phase de lancement, le mouvement du centre de masse M du palet est uniformément accéléré.

b. Exprimer puis calculer son accélération pendant la phase de lancement.

c. Calculer la valeur de la force que le joueur a exercé sur le palet.

d. Quel est le mouvement du centre de masse du palet pour $t > 3{,}0$ s ?

2. En réalité il y a des frottements et le palet, lancé avec la vitesse v_L précédente, parcourt une distance $d = 40$ m et atteint le but avec une vitesse que l'on considère comme nulle.

a. Calculer l'intensité de la force de frottement, supposée constante, qui s'exerce sur le palet tout au long du parcours.

b. En déduire la valeur de la force $\vec{F}'$ réellement exercée par le joueur.

Coups de pouce

- Le mouvement du centre de masse est uniformément accéléré si l'accélération $\vec{a}$ est constante.
- Le poids qui modélise l'action de la Terre sur le palet et la réaction qui modélise l'action du sol sur celui-ci se compensent.
- • On montre que seule la force de frottement travaille.
  • On applique le théorème de l'énergie cinétique entre l'instant où la vitesse est égale à v_L et l'instant où la vitesse est nulle.
- La valeur de l'accélération est la même que dans **1.** (même variation de vitesse pendant la même durée).

50 min

3 Descente en snowboard

On s'intéresse au mouvement d'une snowboardeuse de masse $m = 60$ kg, sur une piste enneigée ABCDE (Fig 1).

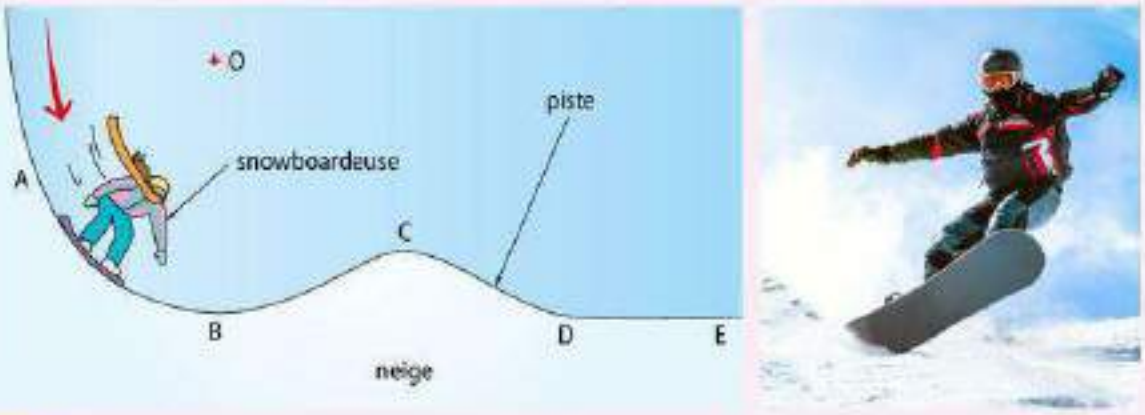


FIG 1 Schéma de la piste

Les parties 1, 2 et 3 sont indépendantes.

1. Vitesse et accélération

Un film vidéo du mouvement traité par chronophotographie permet de représenter les positions successives toutes les 0,16 s du centre de masse G de la snowboardeuse glissant sur la partie ABC de la piste (Fig 2).

La trajectoire de G est alors un arc de cercle de centre O.

À la date $t = 0$ s, le point G se trouve à la position G_0, la vitesse initiale est nulle et la snowboardeuse se laisse ensuite glisser (elle est en G_1 à la date t_1, en G_2 à la date t_2, etc.).

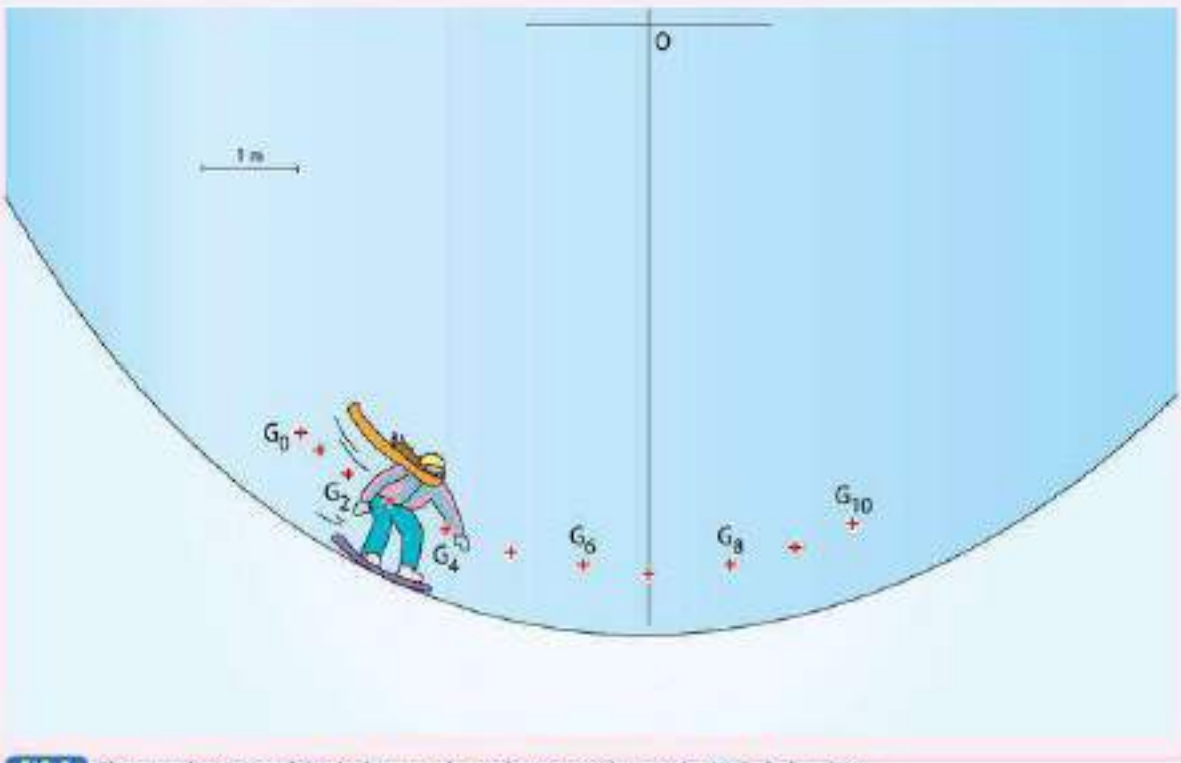


FIG 2 Chronophotographie de la snowboardeuse sur la partie ABC de la piste

1. a. Déterminer les valeurs V_6, V_7 et V_8 des vecteurs vitesse du centre de masse de la snowboardeuse respectivement aux dates t_6, t_7 et t_8.
b. Reproduire la figure 1 et tracer avec une échelle adaptée les vecteurs $\vec{V}_6$ et $\vec{V}_8$.

2. Construire, avec l'origine au point G_7, le vecteur $\Delta\vec{V} = \vec{V}_8 - \vec{V}_6$ et déterminer, à l'aide de l'échelle choisie précédemment, la valeur ΔV du vecteur $\Delta\vec{V}$.

3. En déduire la valeur a_7 du vecteur accélération du centre de masse à l'instant t_7 et construire le vecteur $\vec{a}_7$ à l'aide d'une échelle adaptée.

4. a. En utilisant la construction, déterminer la valeur $a_{N_{mes}}$ de la composante normale du vecteur accélération $\vec{a}_7$. Estimer l'incertitude-type associée au résultat.
b. Déterminer la valeur a_{Nth} sachant que le rayon de la trajectoire de G est 4,5 m.
Comparer le résultat de la mesure $a_{N_{mes}}$ à a_{Nth} que l'on considérera comme la valeur de référence en utilisant l'incertitude-type associée au résultat.

2. Forces de frottement

Après avoir franchi la bosse au point C, la snowboardeuse arrive sur la partie horizontale DE, avec une vitesse de 4,6 m · s^{-1} au point D.

1. Faire le bilan des forces qui modélisent les actions mécaniques qui agissent sur la snowboardeuse, en considérant que l'ensemble des forces de frottement peut être représenté par une force unique $\vec{F}$ colinéaire et de sens opposé au vecteur $\vec{V}$ et de valeur constante.
Représenter ces forces sur un schéma sans souci d'échelle.

2. Sachant que la snowboardeuse parcourt 15 m sur le plan horizontal avant de s'immobiliser au point E, déterminer la valeur de la force $\vec{F}$.

3. Étude énergétique

L'enregistrement vidéo du mouvement complet (de A à E) et le traitement informatique des données permet de tracer les courbes d'évolution des énergies cinétiques E_c, potentielle de pesanteur E_p et mécanique E_m de la snowboardeuse en fonction du temps.

On obtient les courbes A, B et C ci-dessous (Fig 3).

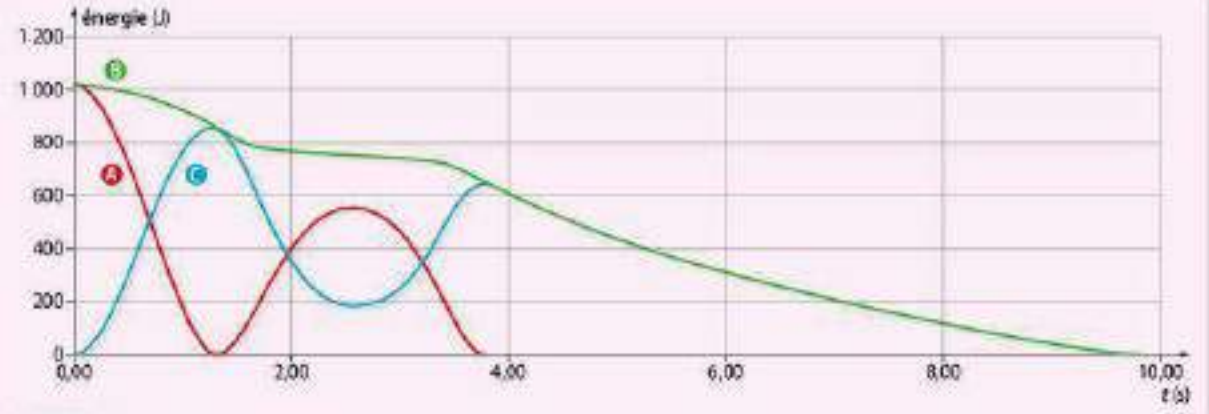


FIG 3 Courbes d'évolution des énergies

Identifier chacune de ces 3 courbes en justifiant la réponse.

50 min

4 Lancer de « poids »

En 1990, l'américain Randy Barnes établit le record du monde du lancer de « poids » : la distance atteinte est d = 23,12 m. Le « poids » est constitué par une sphère métallique lisse de masse m = 7,26 kg. L'aire de lancement est délimitée par un cercle métallique de diamètre D = 2,14 m et par un butoir B. La portée du jet d est mesurée à partir du centre C du cercle (Fig 1).

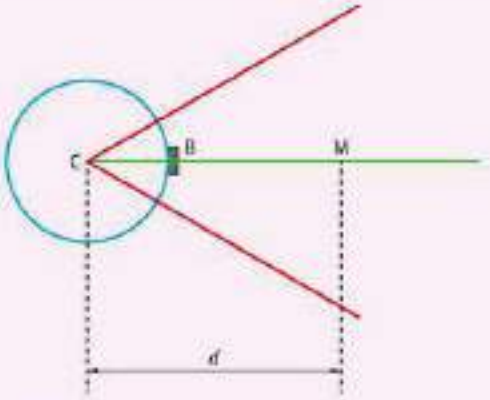


FIG 1 Portée du jet



FIG 2 Position d'un athlète dans l'aire de lancement

À l'issue de la phase d'élan, le « poids » est abandonné en A, à la hauteur $OA = h = 2{,}00$ m au-dessus du sol horizontal, à la distance $BO = 0{,}35$ m en avant du butoir B (Fig 3).

Le bras qui lance fait un angle de 45° avec l'horizontale, valeur préconisée par les entraîneurs et justifiée par la physique, pour une portée maximale. Cet angle $\alpha = 45°$ sera considéré comme étant celui de la direction du vecteur vitesse $\vec{v}_0$ avec l'horizontale.



FIG 3 « Poids » abandonné en A à l'issue de la phase d'élan

Donnée : *intensité de pesanteur :* $g = 9{,}8\ m \cdot s^{-2}$

Les parties 1, 2 et 3 sont indépendantes.

1. Choix d'un modèle

La résultante R des forces de frottement due à la résistance de l'air est donnée par l'expression : $R = (1/2) \cdot \rho \cdot C_x \cdot S \cdot V^2$ où ρ est la masse volumique de l'air ($\rho = 1{,}29$ kg · m^{-3}), S l'aire de la section équatoriale de la sphère ($S = 1{,}13 \times 10^{-2}$ m^2), C_x un coefficient caractéristique de la forme de l'objet ($C_x = 0{,}50$ SI) et V la valeur de la vitesse.

Montrer qu'on peut négliger la résistance de l'air vis-à-vis de la force de pesanteur qui modélise l'action sur la Terre sur le « poids » sachant qu'au cours du mouvement la vitesse est de l'ordre de 10 m · s^{-1}.

2. Étude du mouvement

On admettra dans la suite de l'exercice que les frottements sont négligeables.

1. a. Établir les équations horaires du mouvement du « poids » dès l'instant où ce dernier est abandonné en A.

b. Dans le repère $(O ; \vec{i}, \vec{k})$, donner l'équation $z(x)$ de la trajectoire.

c. Quelle est la nature de la trajectoire ?

2. À partir de l'équation cartésienne de la trajectoire et des différents paramètres fournis, vérifier que la vitesse initiale V_0 est voisine de 14 m · s^{-1}.

Dans la suite, c'est cette valeur de la vitesse initiale qui sera retenue.

3. a. Déterminer la durée t_M du déplacement du « poids » entre A et M.

b. En déduire la valeur V_M de la vitesse au moment du contact avec le sol.

4. À l'aide d'un programme, il est possible de tracer la trajectoire du « poids ». Compléter l'extrait du programme suivant en écrivant uniquement les **morceaux de programme manquants.**

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
# fonctions associées aux lois horaires
def x(t,g,v0,alpha) :
  return                                    (1)

# paramètres physiques
g = 9.81 # acceleration de la pesanteur
h =    (2) # altitude initiale
v0 =    (3) # vitesse initiale
# angle en degrés
alpha_deg = 45.0
# Python calcul en radians
alpha = alpha_deg * np . pi /    (4)
# intervalle temporale d'étude
t_min = 0.0 # instant initial
t_max =    (5) # instant final
n_t = 100 # nombre de points
# tableaux
tab_t = np . linspace(t_min,t_max,n_t)
tab_x = x(tab_t,g,v0,alpha)
tab_z = z(tab_t,g,h,v0,alpha)
```

3. Aspect énergétique

1. Déterminer l'énergie cinétique fournie par l'athlète au « poids » au moment du lancer.

2. a. L'origine des énergies potentielles étant fixée au niveau du sol horizontal, déterminer l'expression et la valeur de l'énergie mécanique du « poids » au moment du lancer.

b. En déduire l'expression et la valeur de sa vitesse au point de chute M.
Le résultat est-il cohérent avec celui trouvé à la question 3. de la partie 2.

50 min

5 Satellites de Jupiter

Il existe au moins 79 satellites en orbite autour de Jupiter. Les quatre principaux furent découverts par Galilée en 1610 : Io, Europe, Ganymède et Callisto.

DOC Principales caractéristiques orbitales et physiques des satellites de Jupiter

Satellites de Jupiter	Io	Europe	Ganymède	Callisto
				
Demi-grand axe de l'orbite (km)	422 000	671 000	1 070 000	1 880 000
Période sidérale (jours)	1,769	3,551	7,155	16,69
Excentricité	0	0	0,001	0,01
Inclinaison	0	0	0,2	0,2
Rayon (km)	1 816	1 563	2 638	2 416
Masse (10^{20} kg)	892	487	1 490	1 075
Densité	3,55	3,04	1,93	1,83
Composition superficielle	S, SO2	Glace	Glace	Glace sale

On se propose, après l'avoir démontrée, de vérifier la troisième loi de Kepler en considérant ces 4 satellites de Jupiter.

Ces 4 satellites ont, autour de Jupiter, des trajectoires quasi-circulaires, chacune de rayon correspondant au demi-grand axe noté dans le tableau. On considérera dans la suite que ces trajectoires sont circulaires.

DONNÉES
- Constante de gravitation : $G = 6{,}67 \times 10^{-11}$ SI
- Unité astronomique : $1\ UA = 1{,}50 \times 10^{8}$ km

1. Mouvement des satellites

1. Après avoir précisé le référentiel d'étude, et en admettant négligeable toute interaction autre que celle existant entre Jupiter et un des ses satellites, montrer que ceux-ci ont un mouvement uniforme.

2. Établir l'expression de la période T de ces satellites en fonction de la constante de gravitation G, de la masse de Jupiter M_J et du rayon r de leurs trajectoires respectives.

2. Troisième loi de Kepler

1. La troisième loi de Kepler exprime que le carré de la période est proportionnel au cube du rayon de l'orbite. Donner l'expression littérale du rapport T^2 / r^3.

2. Vérifier numériquement que les 4 satellites de Jupiter obéissent à cette loi.

3. Le programme suivant permet de vérifier la troisième loi de Kepler pour le système solaire. Il est adaptable à d'autres système notamment les systèmes satellitaires comme préparé ci-dessous.

```
import matplotlib.pyplot as plt
import scipy.stats as stat
# listes des demi-grands axes a en U.A et périodes des
  planètes en années
LIST_a = [0.387,0.723,1.0,1.52,5.20,9.51,19.2,30.0]
LIST_T = [0.240,0.615,1.0,1.88,11.9,29.4,84.0,165.0]
LIST_P = ['Mercure','Venus','Terre','Mars',
  'Jupiter','Saturne','Uranus','Neptune']
# les valeurs dans listes a au cube et T au carré
for i in range(0, len(LIST_a)):
    LIST_a[i] = (LIST_a[i]*150e9)**3
    LIST_T[i] = (LIST_T[i]*365*24*3600)**2
# régression linéaire afin de vérifier la troisieme loi
  de Kepler
regression = stat.linregress(LIST_a,LIST_T)
pente =regression[0]
print('pente --> '+str(pente))
ordorigine =regression[1]
print('ordonnée à l origine --> '+str(ordorigine))
coeffcorel = regression[2]
print('coefficient de corrélation --> '+str(coeffcorel))
#affichage point et droite de regression
a_3_max = LIST_a[len(LIST_a)-1]
T_2_max =pente *a_3_max + ordorigine
plt.grid(True)
plt.xlabel(« a au cube (m3)»)
plt.ylabel(«periode au carré (s2)»)
plt.scatter(LIST_a,LIST_T,s = 100,c ='red', marker ='+')
for i in range (0,len(LIST_a)):
    plt.text(LIST_a[i],LIST_T[i], LIST_P[i],fontsize =8)
plt.plot ([0,a_3_max],[ordorigine,T_2_max],c ='blue')
plt.show()
```

Dire combien de lignes de programme faut-il réécrire pour adapter le programme aux satellites de Jupiter et réécrire ces lignes de programme.

3. Proposer une stratégie permettant de déterminer la masse de Jupiter.

3. Aspect énergétique

Le système formé par Jupiter et un de ses satellites a été considéré comme isolé, l'énergie potentielle de ce système a pour expression :

$$E_p = -GM_j m / r$$

M_j masse de Jupiter et m masse du satellite

1. Établir que l'énergie mécanique du système est constante.

2. Exprimer cette énergie mécanique en fonction de G, M_j, m_s et r.

EXERCICES DE SYNTHÈSE PREPA BAC

50 min

6 Particules en mouvement dans un champ

L'exercice a pour but de comparer le mouvement d'une particule chargée traversant un champ électrique et le mouvement d'un projectile lancé horizontalement dans le champ de pesanteur terrestre.

1. Déviation d'un faisceau d'électrons dans un champ électrique uniforme

Le champ électrique $\vec{E}$ est créé par un condensateur plan constitué de deux plaques parallèles et horizontales (P1 et P2) reliées à un générateur de tension constante U et séparées d'une distance d (= 0,040 m), comme l'indique la figure 1.

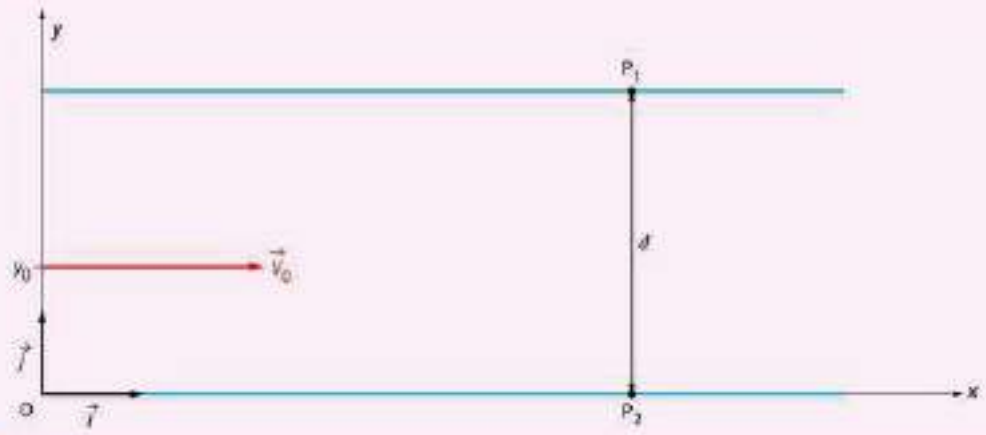


FIG 1 Modélisation du condensateur

Tous les électrons pénètrent dans le champ $\vec{E}$, supposé uniforme, à l'ordonnée y_0 et sont animés de la vitesse $\vec{v}_0$ parallèle aux plaques.

1. a. Déterminer la valeur du champ électrique E.
b. En déduire, par un calcul, qu'il est légitime de négliger la force de pesanteur qui modélise l'action de la Terre sur l'électron par rapport à la force électrique qui modélise l'action du champ électrique sur l'électron.

2. Un électron pénètre dans le champ à l'instant initial ($t = 0$). Établir en citant la loi utilisée, l'expression vectorielle de son accélération $\vec{a}_1$ en fonction de e, m et $\vec{E}$.

DONNÉES
- Masse de l'électron : $m = 9{,}1 \times 10^{-31}$ kg
- Champ de pesanteur : $g = 9{,}81\ m \cdot s^{-2}$
- Charge de l'électron : $q = -e = -1{,}6 \times 10^{-19}$ C
- Distance entre les plaques du générateurs $d = 0{,}040$ m
- Tension du générateur : $U = 205$ V
- Vitesse de l'électron à l'entrée du dispositif : $v_0 = 1{,}5 \times 10^7\ m \cdot s^{-1}$

3. On veut que le faisceau soit dévié vers le bas.
a. Reproduire la figure 1 et représenter (sans souci d'échelle) :
- la force qui modélise l'action qui s'exerce sur la particule à son entrée dans le champ ;
- le champ électrique.

b. Quelle est la plaque qui est chargée positivement ? Justifier la réponse.

3. Équation de la trajectoire.
a. Donner les composantes du vecteur accélération dans le repère $(O ; \vec{i}, \vec{j})$ indiqué sur la figure 1.
b. Établir les équations horaires du mouvement de la particule dans ce repère.
c. Montrer que l'équation de la trajectoire est de la forme $y = A_1 \cdot x_2 + B_1$ où A_1 et B_1 sont des constantes.
d. Quelle est l'allure de la trajectoire ?
e. Vérifier que la constante A_1 est liée à la valeur de l'accélération a_1 par la relation $A_1 = -a_1/(2\,v_0^2)$.
f. Calculer A_1.

2. Mouvement d'une bille lancée horizontalement dans un champ de pesanteur

Une bille homogène de masse M est lancée horizontalement avec une vitesse initiale $\vec{V}_0$.

À l'instant initial, son altitude par rapport au sol est Y_0 comme l'indique la figure 2.

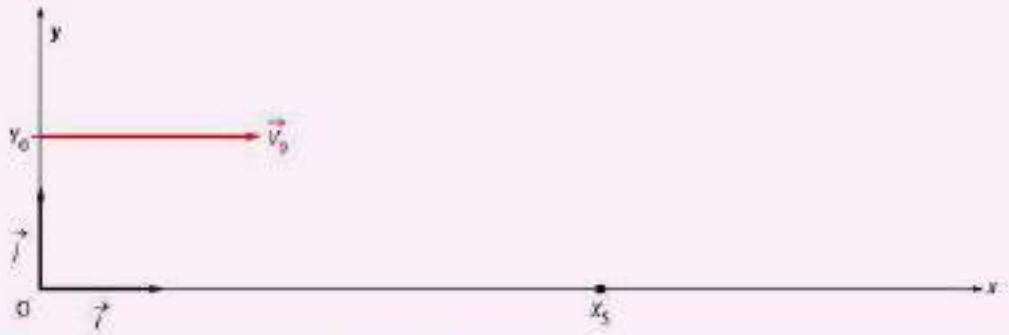


FIG 2 Schématisation du lancer de la bille à l'instant initial

1. Quelles sont les forces qui modélisent les actions dues à l'air sur la bille au cours du mouvement ? Dans la suite du problème, ces forces seront négligées.

2. Donner les caractéristiques du vecteur accélération $\vec{a}_2$ du mouvement (direction, sens et valeur).

3. a. Montrer que l'équation de la trajectoire est de la forme :

$$y = A_2 \cdot x_2 + B_2$$

où A_2 et B_2 sont des constantes avec $A_2 = -a_2/(2\,v_0^2)$.

b. Calculer A_2.

4. La bille touche le sol à l'abscisse $X_S = 7{,}75$ m. Retrouver avec cette donnée, la valeur de la constante A_2.

5. Donner l'allure de l'évolution de l'énergie cinétique de la bille et de son énergie potentielle au cours du temps.

DONNÉES

- Champ de pesanteur : $g = 9{,}81\ m \cdot s^{-2}$
- Vitesse initiale de la bille : $v_0 = 14{,}0\ m \cdot s^{-1}$
- Hauteur de la bille au moment du lancement : $Y_0 = 1{,}5$ m

3. Comparaison des mouvements de ces deux corps

1. Comparer la trajectoire du centre de masse de chacun de ces deux corps.

2. Dans chaque cas, quelle est l'influence de la masse du corps sur :
- la force qui modélise l'action subit par ce corps ?
- l'accélération du mouvement ?

EXERCICES DE SYNTHÈSE PREPA BAC

À la date de publication de ce manuel, les notions mobilisées pour cet exercice sont exclues de l'épreuve écrite.

50 min

7 Fontaine avec son jet d'eau

L'eau d'une fontaine est fournie par un réservoir situé en hauteur. Ce réservoir, à l'air libre, est constamment alimenté de sorte que son niveau peut être considéré comme constant.

L'eau est conduite au bassin par une canalisation jusqu'à un « jet réducteur » pour être au final recueillie dans un bassin circulaire.

L'ensemble est schématisé à la **figure 1**.



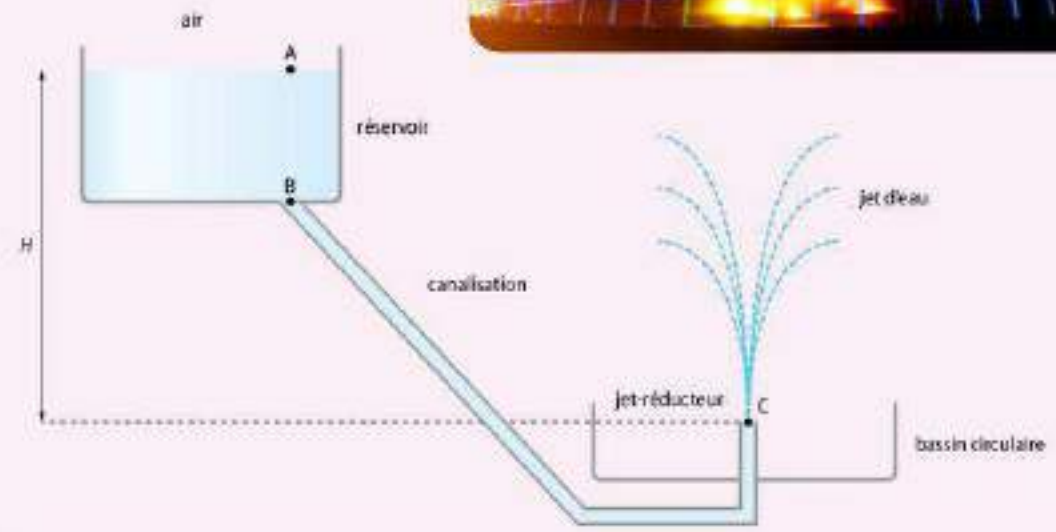


FIG 1 La fontaine avec son jet d'eau, son bassin circulaire et son réservoir

DONNÉES

- Dénivellation entre les points A et C : $H = 15{,}0$ m
- Dimension de la canalisation : section circulaire de rayon $r_1 = 450$ mm
- Dimension du « jet-réducteur » : ouverture circulaire de rayon $r_2 = 55{,}0$ mm
- Dimension du bassin : rayon $R = 5{,}0$ m et volume $V = 40$ m^3
- Intensité de pesanteur : $g = 9{,}80$ N · kg^{-1}
- Pression atmosphérique : $P_0 = 1{,}00 \times 10^5$ Pa
- Masse volumique de l'eau : $\rho_{eau} = 1{,}00 \times 10^3$ kg · m^{-3}
- Masse volumique de l'air : $\rho_{air} = 1{,}22$ kg · m^{-3}

LOIS DE MÉCANIQUE DES FLUIDES

- Loi fondamentale de la statique des fluides : $P_B - P_A = \rho \cdot g \cdot (z_A - z_B)$
- Équation de Bernoulli : $1/2 \cdot \rho \cdot v + \rho \cdot g \cdot z + P$ = constante

1. Dégagement d'une pierre obstruant l'ouverture du jet

Une pierre de masse $m = 1{,}50$ kg obstrue l'ouverture du jet en C, si bien que l'eau ne découle pas.

a. Quelle doit être la valeur minimale de la force modélisant l'action mécanique qui doit s'exercer sur la pierre pour qu'elle soit dégagée ?

b. En déduire la valeur de la pression P_C correspondant à la sortie du jet.

c. En appliquant la loi fondamentale de la statique des fluides, déterminer la hauteur minimale H_{min} assurant un dégagement de cette pierre ? Conclure.

2. Débit volumique du jet et conséquence

L'ouverture étant libérée, l'eau peut donc jaillir par le jet en C, à l'air libre.

a. En appliquant l'équation de Bernoulli, établir l'expression de la vitesse v_2 avec laquelle l'eau sort en C. Vérifier qu'elle vaut $v_2 = 17{,}1\ m \cdot s^{-1}$.

b. En utilisant la conservation du débit volumique, en déduire l'expression de la vitesse v_1 de l'eau dans la canalisation. En déduire la valeur de v_1.

c. Quel est le débit volumique Q_v du jet ?

d. De quelle durée Δt dispose-t-on avant que le bassin ne déborde ? On supposera le bassin initialement vide.

3. Trajectoire du jet d'eau

On considère individuellement chaque goutte d'eau de masse m sortant librement au niveau du jet avec une vitesse $v_0 = 17{,}1\ m \cdot s^{-1}$. On négligera les frottements.

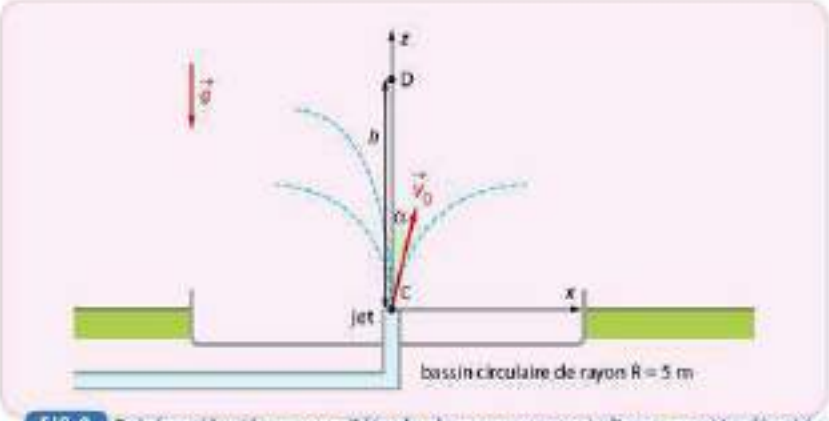


FIG 2 Schématisation pour l'étude du mouvement d'une goutte éjectée

3.1. Goutte éjectée verticalement

On cherche à déterminer la hauteur maximale atteinte par une goutte éjectée verticalement. On choisira comme référence de l'énergie potentielle de pesanteur, la hauteur à la sortie C.

a. Établir l'expression de l'énergie mécanique E_{mC} de la goutte d'eau à la sortie du jet en C.

De même, établir l'expression de l'énergie mécanique E_{mD} lorsque la goutte atteint le point D de hauteur maximale h.

b. En déduire la hauteur maximale h atteinte par la goutte, et donc par le jet d'eau et dire pourquoi en réalité le jet n'atteint pas cette hauteur.

3.2. Goutte éjectée avec un angle α

On considère maintenant une goutte éjectée avec un angle α toujours à la vitesse $v_0 = 17{,}1\ m \cdot s^{-1}$.

a. Montrer que dans le cas de cette étude, on peut négliger la poussée d'Archimède.

b. Déterminer les coordonnées de l'accélération de la goutte dans le repère (O, x, z) et en déduire les équations horaire du mouvement de la goutte.

c. Déterminer l'équation de la trajectoire de la goutte.

d. Déterminer la portée, c'est-à-dire la distance x_m à laquelle la goutte atterrit.

e. Pour quel angle α_0 la goutte atterrit le plus loin ? Est-ce acceptable pour le basin considéré ?

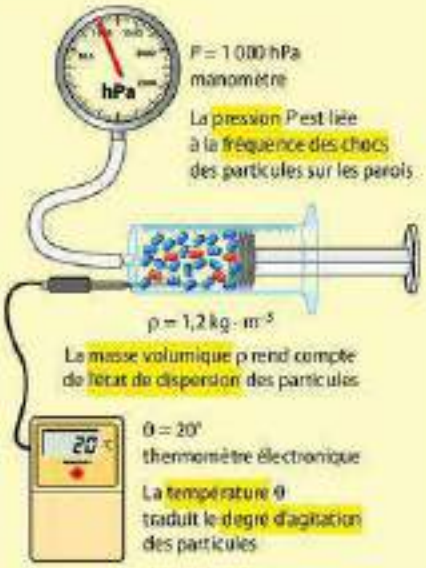
Avant d'aborder le chapitre EN AUTONOMIE

LES ACQUIS INDISPENSABLES

1re Enseignement de spécialité

Les grandeurs de description d'un gaz

La température, la pression et la masse volumique sont des grandeurs macroscopiques qui rendent compte du comportement microscopique des constituants des gaz.



Loi de Mariotte : à température constante, le volume V occupé par une quantité de matière de gaz donnée dépend de la pression P de ce gaz.

pression du gaz (en **Pa** ou **bar**) → $P \cdot V = \text{constante}$

Volume (en $\mathbf{m^3}$ ou **L**) ; (en $\mathbf{Pa \cdot m^3}$ ou en $\mathbf{bar \cdot L}$)

Volume molaire V_m d'un gaz : volume occupé par une mole d'entités chimiques à température et pression données. Le volume molaire d'un gaz ne dépend pas de sa nature mais uniquement de la température et de la pression.

quantité de matière (en **mol**) → $n = \dfrac{V}{V_m}$

V : volume (en **L** ou en $\mathbf{m^3}$)

V_m : volume molaire (en $\mathbf{L \cdot mol^{-1}}$ ou $\mathbf{m^3 \cdot mol^{-1}}$)

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

Pour chaque situation, rédiger une réponse qui explique en quelques lignes le raisonnement.

SITUATION 1

Les ballons vendus dans les foires sont gonflés à l'hélium, un gaz plus léger que l'air.

Pourquoi peuvent-ils éclater au soleil ?



SITUATION 2

Au sol, à la pression de 1,0 bar, un ballon est gonflé avec 3,0 m^3 d'hélium. À 4,0 km d'altitude, la pression atmosphérique n'est plus que 0,60 bar.

Quel est le volume du ballon à cette altitude ?

SITUATION 3

À 20 °C et 1 013 hPa, 2,0 mol de dioxyde de carbone occupent un volume égal à 48,1 L.

Quelle est la valeur du volume molaire de l'hélium dans les mêmes conditions de température et de pression ?



CHAPITRE

15

PHYSIQUE

Modèle du gaz parfait



Les montgolfières sont les premiers aéronefs ayant permis de s'élever dans l'atmosphère. Comment peut-on expliquer que le chauffage du volume de l'air du ballon permet le décollage de la montgolfière ?

→ EXERCICE 35

NOTIONS ET CONTENUS

- Modèle du gaz parfait.
- Masse volumique, température thermodynamique, pression.
- Équation d'état du gaz parfait.

1. ACTIVITÉ DE DÉCOUVERTE

CLASSE INVERSÉE

COMPÉTENCES :
APP Rechercher et organiser l'information en lien avec la problématique étudiée
ANA RAI Choisir un modèle ou des lois pertinentes

Décrire le comportement d'un gaz

Les valeurs de la masse volumique, de la température thermodynamique et de la pression d'un gaz sont liées aux propriétés de ces constituants microscopiques. Quels sont ces liens ?

DOC 1 Gonflage d'un ballon

Un manomètre mesure la valeur de la pression P de l'air lors du gonflage d'un ballon. On observe le comportement des constituants microscopiques du gaz et l'effet sur la pression.



DOC 2 Modèle microscopique du gaz parfait

Un gaz, supposé parfait, est enfermé dans un récipient. Les valeurs du volume V occupé, de la quantité n de gaz emprisonné et de la température thermodynamique T peuvent être doublées. On observe le comportement des constituants microscopiques du gaz et l'effet sur la pression.



DOC 3 Le gaz parfait

Le **gaz parfait** est un **modèle**, c'est-à-dire une simplification de la réalité. Dans ce modèle, à **l'échelle microscopique**, les molécules sont assimilées à des points matériels et animées d'un mouvement rectiligne uniforme entre deux chocs. À **l'échelle macroscopique**, les valeurs des grandeurs physiques P, V, n et T mesurées sont liées par une relation mathématique nommée **équation d'état du gaz parfait.**

VOCABULAIRE

Température thermodynamique :

- grandeur traduisant le degré d'agitation des constituants microscopiques d'un système ;
- notée T et exprimée en **Kelvin (K)**, elle est obtenue par une translation par rapport à l'échelle des températures θ en degré Celsius (°C) : $T = \theta + 273{,}15$.

EXPLOITATION ET ANALYSE

1 Faire le lien entre le comportement des constituants microscopiques et :

- la pression P mesurée ;
- la température T mesurée ;
- le volume V mesuré ;
- la masse volumique ρ.

Je réussis si...

- **je sais faire le lien entre les valeurs des grandeurs macroscopiques mesurées et les propriétés microscopiques des particules.**
- **je sais identifier une relation pertinente entre les grandeurs macroscopiques mesurées.**

SYNTHÈSE

2 Donner en justifiant la relation qui permet de modéliser, pour un gaz parfait, le lien entre les grandeurs macroscopiques mesurées :

a. $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$

c. $P \cdot V = \dfrac{R \cdot T}{n}$

b. $P \cdot T = n \cdot R \cdot V$

d. $P \cdot V = \dfrac{n \cdot R}{T}$

(R et n désignent respectivement une constante et la quantité de matière présente dans l'échantillon de gaz.)

TP

COMPÉTENCES :
(RÉA) Mettre en œuvre un protocole expérimental
(VAL) Confronter un modèle à des résultats expérimentaux

L'équation d'état du gaz parfait

Le comportement du gaz parfait, représentation simplifiée des gaz réels, est modélisé par l'équation d'état du gaz parfait. Comment valider ce modèle expérimentalement ?

DOC 1 Le dispositif expérimental



À 20 °C, un ballon clos contenant de l'air est refroidi dans un bain de glace puis chauffé au moyen un bain-marie. Deux capteurs reliés à un microcontrôleur permettent de mesurer la pression P et la température θ de l'air à l'intérieur du ballon.

DOC 2 Programmation (FICHE PRATIQUE ➡ p. 560)

Programme Python pour des mesures simultanées des valeurs de la pression et de la température.

```
float tension1=0;
float tension2=0;
  //Définition des tensions renvoyées par le capteur de pression
  et la thermistance
float pression=0;
float temperature=0;
//declaration des variables pression et temperature
void setup()  {
  Serial.begin(9600);//initialise la communication avec le PC
  }
  void loop () {
    tension1 = analogread(-----)*5.0/1023;
    tension2 = analogread(-----)*5.0/1023;
      //Mesure des tensions 1 et 2 sur les ports choisis
    pression = tension1*(----);
    temperature=tension2*(----);
      //Calcul de la pression et de la température (selon
      les capteurs utilisés)
    Serial.print("P=");
    Serial.print(pression);
    Serial.print("hPa");//affichage de la pression et de son unité
    Serial.print("/t T =");
    Serial.print(temperature)
    Serial.print("°C");//affichage de la température et de son unité
    delay(-----);//durée en ms entre deux mesures
```

DOC 3 L'équation d'état du gaz parfait

On appelle gaz parfait, un gaz pour lequel la relation suivante est exactement vérifiée :

constante du gaz parfait $R = 8{,}31\ J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

- P : pression (en Pa)
- V : volume (en m^3)
- n : quantité de matière (en mol)
- T : température thermodynamique (en K)

DOC 4 Le dispositif expérimental

$$T = \theta + 273{,}15$$

- T : température thermodynamique en Kelvin (K)
- θ : température de l'échelle Celsius (°C)

La température thermodynamique rend compte du degré d'agitation microscopique des particules d'un système. Quand il n'y a plus d'agitation microscopique, $T = 0$ K : c'est le zéro absolu.

MESURES

Adapter les lignes du programme (doc. 2) aux types de capteurs utilisés puis effectuer l'acquisition des variations de la pression P de l'air du ballon en fonction de sa température θ.

ANALYSES

1 a. À l'aide d'un tableur (FICHE PRATIQUE ➡ p. 564), montrer graphiquement que l'évolution $P = f(\theta)$ d'un volume d'air constant suit avec une bonne approximation celle d'une fonction affine.

b. Déterminer par extrapolation vers les températures basses (graphiquement ou par le calcul) la valeur de l'abscisse θ à l'origine. À l'échelle microscopique, quelle est la signification de cette valeur ?

2 a. Montrer graphiquement que l'évolution de la pression P (en Pa) du volume d'air est proportionnelle à la température thermodynamique T (en K).

b. Faire correspondre la valeur et l'unité du coefficient directeur de la courbe $P = f(T)$ aux termes de l'équation d'état du gaz parfait.

DONNÉES

- $M_{air} = 29{,}0\ g \cdot mol^{-1}$; $\rho_{air} = 1{,}2\ kg \cdot m^{-3}$
- et $V_m = 24{,}1\ L \cdot mol^{-1}$ (à 20 °C et 1 atm)

CONCLUSION

3 a. Dans les conditions de l'expérience, l'air peut-il être assimilé à un gaz parfait ? Justifier la réponse

b. La valeur de référence du zéro absolu valide-t-elle l'étude réalisée ?

Je réussis si...

- **Je sais réaliser les mesures avec un microcontrôleur.**
- **J'ai exploité l'équation d'état du gaz parfait pour décrire le comportement d'un gaz.**

TP

COMPÉTENCES :
(RÉA) Mettre en œuvre les étapes d'une démarche
(VAL) Confronter un modèle à des résultats expérimentaux

Estimer les limites du modèle du gaz parfait

SITUATION-PROBLÈME

Un gaz parfait n'existe pas mais, dans certaines conditions de pression et de température, les résultats obtenus à partir de ce modèle s'appliquent avec une bonne approximation aux gaz réels.

Pour quelles valeurs de la pression peut-on appliquer ce modèle ?

COUP DE POUCE → p. 593

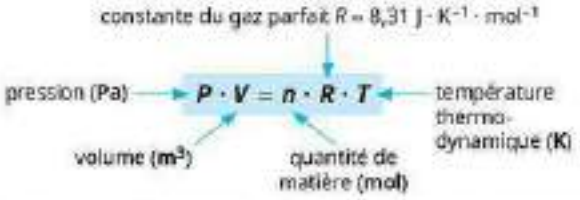
HYPOTHÈSE Proposer une réponse à la question en la justifiant.

DOC 1 Les hypothèses du modèle du gaz parfait



DOC 2 L'équation d'état du gaz parfait

L'équation d'état du gaz parfait modélise le comportement d'un gaz réel.



Pour une quantité de gaz donnée à température constante :

$P \cdot V =$ **constante** (loi de Mariotte)

(valable quelques soit les unités de la pression et du volume utilisées)

DOC 3 Préparation du dioxyde de carbone

Le dioxyde de carbone est un gaz qui peut être produit par l'action d'un acide sur le carbonate de calcium (le calcaire).



Remarque : Déplacer lentement le piston de la seringue évite l'échauffement excessif du système.

MATÉRIEL DISPONIBLE

- Un thermomètre, une seringue et son tuyau, un manomètre, un erlenmeyer et son bouchon percé, un morceau de craie, une solution d'acide chlorhydrique concentré, un ordinateur muni d'un tableur-grapheur, une blouse, des gants et lunettes de protection.

DONNÉE

- $V_m = 24{,}1\ L \cdot mol^{-1}$ à 20 °C et 1 atm

PISTES DE RÉSOLUTION

1. Mettre en œuvre une expérience permettant de relever, à température constante, différents couples de valeurs (P_{GR}, V) : pression du dioxyde de carbone - volume total occupé dans une seringue

2. Faire afficher le graphe $P_{GR} = f(V)$. Modéliser éventuellement la courbe d'évolution obtenue par une fonction inverse : $P_{GR} = a/V$.

3. Calculer pour chacun des volumes précédents, la pression P_{GP} du gaz si on appliquait le modèle du gaz parfait. Superposer $P_{GP} = f(V)$ au graphique précédent.

4. Comparer l'écart de pression entre le gaz réel et le modèle du gaz parfait pour les différentes pressions.

CONCLUSION

5. a. Pour quelles valeurs de la pression du gaz ce modèle peut-il être appliqué ?

b. Proposer une interprétation à l'échelle microscopique.

Je réussis si...

- **J'ai compris que la loi de Mariotte est une formulation de l'équation d'état du gaz parfait.**
- **Je sais proposer une limite d'application du modèle du gaz parfait.**

1 Description d'un gaz

Les grandeurs macroscopiques

À l'échelle macroscopique, l'état d'un gaz peut être décrit au moyen de trois grandeurs mesurables : la **pression** P, la **température** T et la **masse volumique** ρ (FIG. 1). Ces grandeurs sont interdépendantes, c'est-à-dire que la variation de la valeur de l'une d'entre elles modifie la valeur d'au moins une des deux autres.

Grandeur	Température	Pression	Masse volumique
Symbole	T	P	ρ
Unités USI (autres)	K (°C, °F)	Pa (bar, atm, mm Hg)	$kg \cdot m^{-3}$ ($g \cdot L^{-1}$, $g \cdot cm^{-3}$)
Mesure	thermomètre	manomètre	par mesure de masse et de volume puis calcul

FIG. 1 La mesure des grandeurs macroscopiques d'un système.

EXEMPLE

Quand on gonfle un ballon, lorsqu'il a atteint sa forme définitive, son volume V ne varie plus, par contre sa masse volumique ρ augmente.

ANIMATION
Gonflage d'un ballon



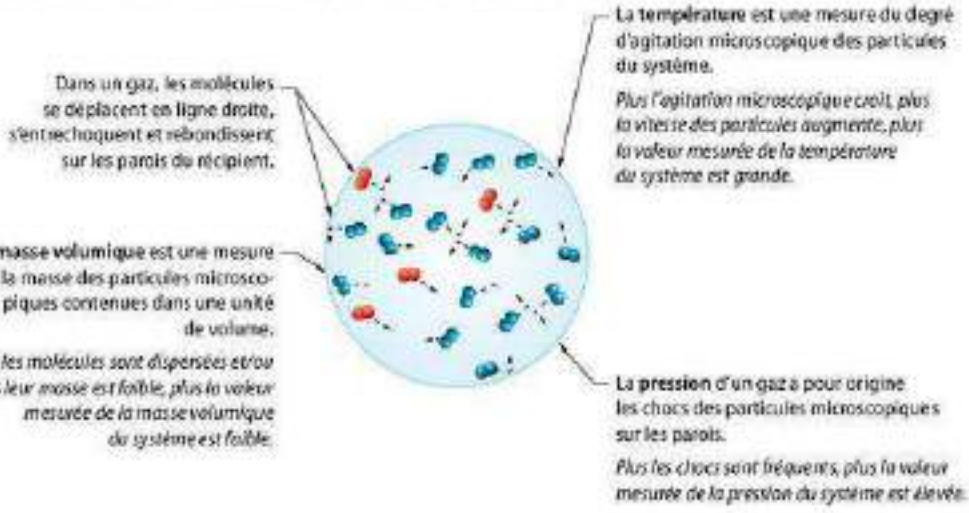
Une animation qui illustre l'évolution des grandeurs de description d'un gaz lors du gonflage d'un ballon

Interprétation microscopique

À l'échelle microscopique, un gaz est décrit par un ensemble de particules (des atomes ou des molécules) distantes les unes des autres et en mouvement incessant. Les valeurs prises par les **grandeurs macroscopiques** mesurées (la pression P, la température T et la masse volumique ρ) sont liées aux **propriétés des constituants microscopiques** du gaz.

EXEMPLE

Dans un ballon, le comportement des constituants microscopiques de l'air contenu se traduit par les valeurs des grandeurs macroscopiques mesurées.



La température thermodynamique

Exprimée en degré Celsius, la valeur d'une température ne rend pas compte du degré d'agitation microscopique des particules d'un système. L'échelle de mesure adaptée utilise le Kelvin comme unité (FIG. 2).

La **température thermodynamique** (aussi nommée température absolue) traduit le degré d'agitation des molécules d'un système. Notée T et exprimée en **Kelvin (K)**, elle est liée à la température θ de l'échelle Celsius (°C) par la relation suivante :

$$T = \theta + 273{,}15$$

T : température thermodynamique (en K) ; θ : température de l'échelle Celsius (en °C)

Remarque. Quand il n'y a **plus d'agitation** des particules microscopiques d'un système, la température thermodynamique est nulle : $T = 0$ K ; c'est le **zéro absolu**. La température thermodynamique est donc **obligatoirement positive** (FIG. 2).

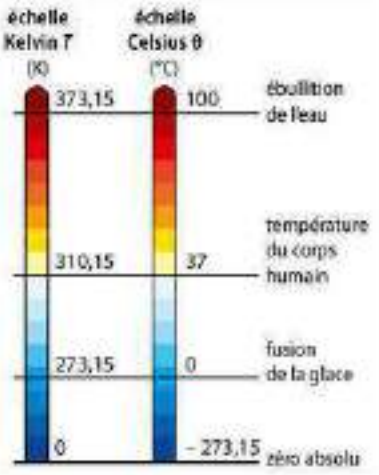
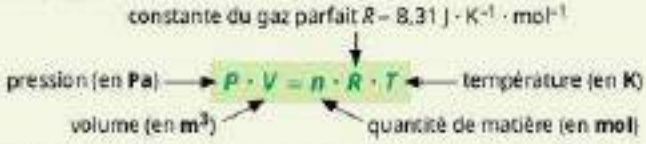


FIG. 2 Les échelles de température et le zéro absolu.

2 Le modèle du gaz parfait

L'équation d'état du gaz parfait

On appelle **gaz parfait**, un gaz pour lequel la relation suivante est exactement vérifiée :



Cette relation mathématique entre les grandeurs macroscopiques qui décrivent l'état d'un gaz est nommée **équation d'état du gaz parfait**. Pour de nombreux gaz, l'étude des variations des grandeurs macroscopiques montre que cette relation est quasiment vérifiée.

Remarque. Une quantité de matière n d'un gaz considérée est liée à sa masse volumique ρ par la relation : $n = \frac{m}{M} = \frac{\rho \cdot V}{M}$ (où m et M désignent respectivement la masse et la masse molaire du système). L'équation d'état du gaz parfait peut alors s'écrire $P \cdot V = \frac{\rho \cdot V}{M} \cdot R \cdot T$ soit $P = R \cdot \frac{\rho \cdot T}{M}$.

Il vient la relation suivante : $\rho = \frac{P \cdot M}{R \cdot T}$ (avec M en $kg \cdot m^{-3}$)

Pour un gaz réel
$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$



*Dans les **gaz réels**, les molécules interagissent plus ou moins entre elles. Elles possèdent une masse et un volume plus ou moins grands suivant leur nature.*

FIG. 3 Représentation microscopique d'un gaz réel.

Limites du modèle du gaz parfait

Le gaz parfait est un modèle, c'est-à-dire une simplification de la réalité. Un gaz parfait n'existe pas en tant que tel mais, les gaz réels, dans certaines conditions, ont un comportement qui s'en rapproche (FIG. 3 ET FIG. 4).

À de **faibles pressions** allant jusqu'à quelques bars, c'est-à-dire lorsque les molécules qui constituent le gaz sont très éloignées les unes des autres, un **gaz réel se comporte comme un gaz parfait.**

Pour un gaz parfait
$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$



*Dans le modèle du **gaz parfait**, toutes les interactions entre les molécules (à l'exception de celles qui ont lieu lors de chocs entre elles) sont négligées. On néglige également leur poids et leur volume devant le volume occupé par le gaz.*

Les molécules sont assimilées à des points matériels et sont animées d'un mouvement rectiligne uniforme entre deux chocs.

FIG. 4 Représentation microscopique du gaz parfait.

Exploitation de l'équation d'état du gaz parfait

Le modèle du gaz parfait permet des calculs simples et les résultats obtenus sont applicables avec une bonne approximation aux gaz réels.

Loi de Mariotte : Si la température T d'une quantité de matière n donnée d'un gaz est constante, alors le produit $n \cdot R \cdot T$ **est constant**. D'après l'équation d'état du gaz parfait il en résulte que le produit $P \cdot V$ **est constant.**

Loi d'Avogadro-Ampère : *« Pris dans les mêmes conditions de température et de pression tous les gaz ont le même volume molaire »*.

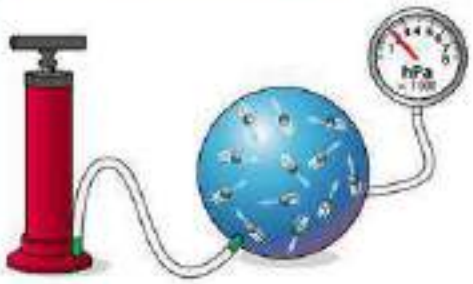
Pour une quantité de matière $n = 1$ mol d'un gaz, la valeur du volume occupé par le gaz, nommé volume molaire V_m ne dépend que de sa température et de sa pression : $V_m = R \cdot \frac{T}{P}$. Si la température T et la pression P sont fixées, alors le volume molaire conserve la même valeur quel que soit la nature du gaz.

EXEMPLE

Dans les conditions habituelles de température T et la pression P (20 °C et 1,0 bar), le volume molaire d'un gaz vaut :

$$V_m = 8{,}31 \times \frac{(273{,}15 + 20)}{(1{,}0 \times 10^5)} = 2{,}4 \times 10^{-2}\ m^3 \cdot mol^{-1} = 24\ L \cdot mol^{-1}$$

1 Description d'un gaz

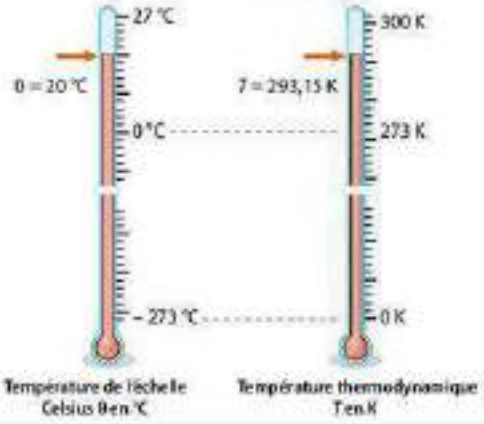


masse volumique ρ : plus les molécules sont dispersées et/ou plus leur masse est faible, plus la valeur mesurée de la masse volumique est faible.

pression P : plus les chocs des molécules sur les parois sont fréquents, plus la valeur mesurée de la pression est élevée.

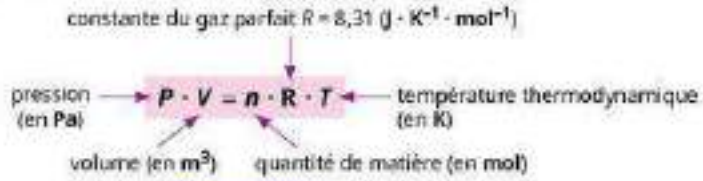
température thermodynamique T : plus l'agitation microscopique croît, plus la vitesse des particules augmente, plus la valeur mesurée de la température est grande.

$$T = \theta + 273{,}15$$



2 Le modèle du gaz parfait

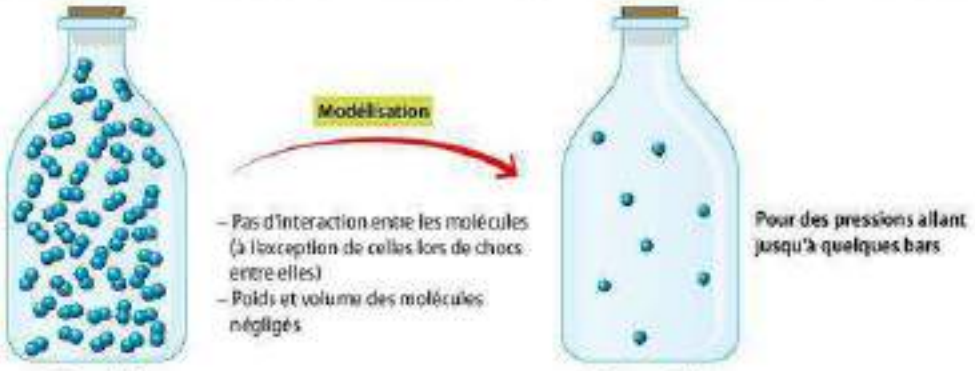
Équation d'état du gaz parfait



Un gaz pour lequel l'équation d'état du **gaz parfait** est exactement vérifiée est un gaz parfait.

Limites du modèle

Le gaz parfait est un modèle qui, dans certaines conditions, permet de décrire le comportement d'un gaz réel.



Gaz réel

$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$

Gaz parfait

$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$

Vérifier l'essentiel

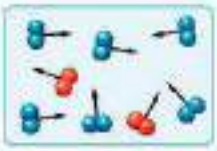
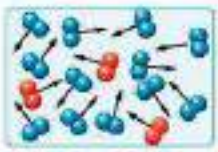
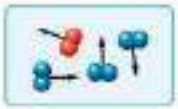
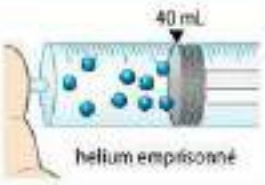
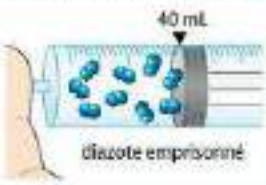
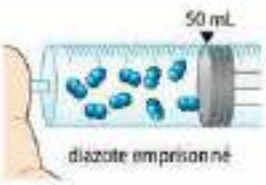
EN AUTONOMIE

Pour chaque question, choisir la ou les bonnes réponses. ➥ SOLUTIONS EN PAGE 593

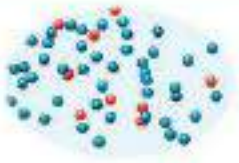
Flash PAGE corrigés détaillés

Flash PAGE QCM interactifs

1 Description d'un gaz

	A	B	C
1 À l'échelle microscopique, la valeur de la pression mesurée d'un gaz dans un récipient est liée :	au degré d'agitation des molécules qui le constituent.	à la fréquence des chocs des molécules sur les parois du récipient.	au nombre et à la masse des molécules qui le constituent.
2 L'échantillon de gaz qui a la valeur de la pression mesurée la plus faible est :			
3 La température thermodynamique T :	traduit le degré d'agitation des molécules d'un système.	est liée à la fréquence des chocs des molécules sur les parois d'un récipient.	s'exprime en °C.
4 L'échantillon qui possède la valeur de la masse volumique la plus grande est :			

2 Le modèle du gaz parfait

	A	B	C
5 Dans l'équation d'état du gaz parfait $PV = n \cdot R \cdot T$, P et V désignent respectivement :	le poids et la vitesse des molécules.	la pression mesurée et la vitesse des molécules.	la pression et le volume mesurés.
6 Dans l'équation d'état du gaz parfait, les unités à utiliser pour exprimer les valeurs des grandeurs P, V et T sont :	• P en Pa • V en L • T en °C	• P en bar • V en m^3 • T en K	• P en Pa • V en m^3 • T en K
7 Pour une quantité de gaz donné à température constante, l'équation d'état du gaz parfait :	s'écrit : $\frac{P}{T} = \text{constante}$.	s'écrit : $P \cdot V = \text{constante}$.	est nommée loi de Mariotte.
8 Le modèle du gaz parfait est :	toujours applicable aux gaz réels.	applicable aux gaz réels seulement pour des pressions inférieures à quelques bars.	applicable aux gaz réels quelle que soit la température du système.
9 À l'échelle microscopique, dans le modèle du gaz parfait :	les molécules sont très éloignées les unes des autres.	il n'y a aucune interaction entre les molécules.	les molécules sont ponctuelles (leur volume est négligeable devant celui du gaz).
10 À l'échelle microscopique, le gaz parfait est représenté par :			

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Acquérir les bases

1 Description d'un gaz

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Masse volumique, température thermodynamique, pression

- Relier qualitativement les valeurs des grandeurs macroscopiques mesurées aux propriétés d'un système à l'échelle microscopique.
- Définir la température thermodynamique d'un système.

→ Acquérir les bases : 11 12 → S'entraîner : 24 25

11 Du microscopique au macroscopique

1. À l'échelle microscopique, à quelle propriété d'un gaz est liée la valeur de :

a. la température
b. la pression
c. la masse volumique

2. La modification de la vitesse des constituants microscopiques d'un volume de gaz donné conduit au changement de la valeur de :

a. la température mesurée
b. la pression mesurée
c. la masse volumique mesurée

3. On considère un volume constant de gaz. Initialement $\theta = 20$ °C, $P = 1\,013$ hPa et $\rho = 1{,}2$ kg · m^{-3}.

Trois scénarios sont envisagés :

a. les molécules se déplacent moins vite
b. les molécules sont plus nombreuses.
c. les molécules sont remplacées par des particules de masse plus faible.

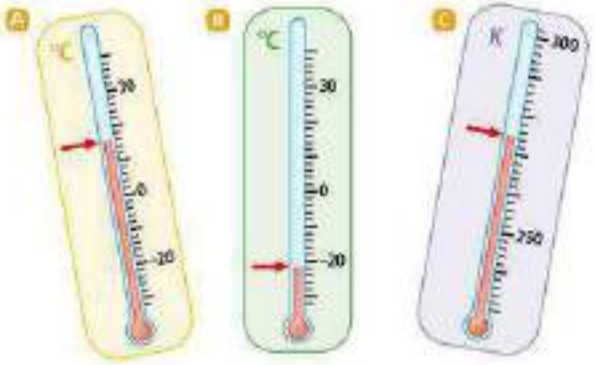
Associer à chaque scénario, les valeurs des grandeurs macroscopiques mesurées adaptées :

d. $\theta = 20$ °C, $P = 1\,025$ hPa, $\rho = 1{,}5$ kg · m^{-3}
e. $\theta = 20$ °C, $P = 1\,013$ hPa, $\rho = 1{,}0$ kg · m^{-3}
f. $\theta = 18$ °C, $P = 1\,005$ hPa, $\rho = 1{,}2$ kg · m^{-3}

12 Échelles de température

1. Qu'appelle-t-on température thermodynamique d'un système ? Quel lien existe-t-il avec la température Celsius ?

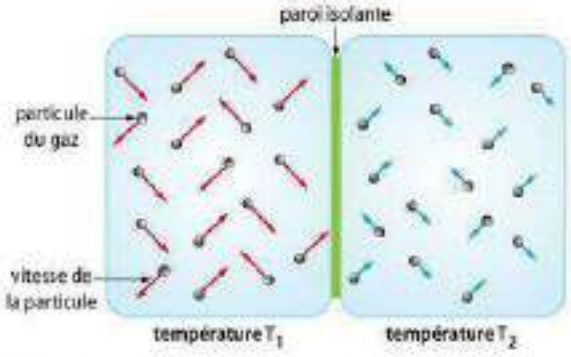
2. Classer par ordre de degré d'agitation moléculaire décroissante, les systèmes dont les valeurs de la température sont mesurées ci-dessous.



3. Quelle est la signification microscopique du zéro sur l'échelle de la température thermodynamique ?

13 Mélange de deux gaz

1. Deux récipients de même volume séparés par une paroi isolante et amovible contiennent le même gaz. L'un d'eux est plus chaud que l'autre.

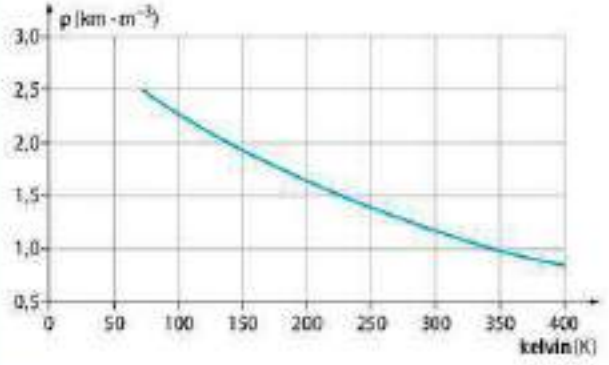


a. Identifier, en justifiant la réponse, le récipient dans lequel la valeur de la température mesurée est la plus grande. En déduire le corps chaud et le corps froid.
b. La valeur de la masse volumique mesurée est-elle la même pour chaque gaz ? Justifier la réponse.
c. La valeur de la pression mesurée est-elle la même pour chaque gaz ? Justifier la réponse.

2. On retire la plaque amovible séparant les deux récipients. Un transfert de l'énergie thermique s'effectue jusqu'à l'équilibre thermique du corps chaud vers le corps froid.
a. Proposer qualitativement une représentation du gaz à l'équilibre à l'échelle microscopique.
b. Quelle propriété des constituants microscopiques du gaz provoque cet échange d'énergie ?
c. Comparer les valeurs des températures T_1, T_2 et T du gaz à l'équilibre thermique.

14 Masse volumique de l'air

Pour de l'air sec sous pression atmosphérique normale (1 013 hPa), la température de fusion $\theta_{fusion} = -216{,}2$ °C, la température d'ébullition $\theta_{ebullition} = -194{,}3$ °C et l'évolution de la masse volumique en fonction de la température est modélisée par le graphique suivant.



1. a. Déterminer graphiquement la valeur de la masse volumique de l'air à 20 °C.
b. Pourquoi la courbe ne débute qu'à partir de 78,9 K ?

2. À l'aide d'un raisonnement à l'échelle microscopique :
a. expliquer pourquoi l'axe des abcisses ne possède aucune graduation de valeur négative.
b. justifier la diminution de la valeur de la masse volumique de l'air en fonction de la température.

2 Le modèle du gaz parfait

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Équation d'état du gaz parfait

- Écrire l'équation d'état du gaz parfait et savoir la décrire (grandeurs, unités).
- Exploiter l'équation d'état du gaz parfait pour décrire le comportement d'un gaz.

→ Acquérir les bases : 15 → S'entraîner : 24 25 33

Modèle du gaz parfait

- Savoir décrire le modèle du gaz parfait à l'échelle microscopique.
- Identifier quelques limites du modèle du gaz parfait.

→ Acquérir les bases : 17 → S'entraîner : 31

DONNÉES

- $M_{air} = 28{,}9\ g \cdot mol^{-1}$; $R = 8{,}314\ J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$; $N_A = 6{,}02 \times 1\,023\ mol^{-1}$; 1 atm = 1 013 hPa.

15 Comportement du gaz parfait

1. Pour un gaz parfait, le produit PV dépend de :
a. sa quantité de matière ?
b. sa nature ?
c. sa température ?

2. Écrire l'équation d'état du gaz parfait en précisant la signification et les unités de chaque grandeur.

3. Comment évolue la pression d'une quantité de gaz parfait donnée lorsque :
a. à volume constant sa température augmente ;
b. à température constante son volume diminue.

16 Pression et température

1. Un ballon de volley-ball de 4,8 L contient 7,5 g d'air à la température de 17 °C. L'air est assimilé à un gaz parfait.
a. Calculer la quantité de matière de gaz dans le ballon.
b. Convertir la température en K et le volume en m^3.
c. Écrire l'équation d'état du gaz parfait et en déduire la valeur de la pression de l'air dans le ballon

2. La température est doublée et sa valeur atteint 34 °C. La variation de volume du ballon est négligeable.
a. Pourquoi la valeur de la pression mesurée n'est-elle pas également doublée ?
b. Donner la nouvelle valeur de la pression de l'air dans le ballon.
c. Pour quelle température en °C la valeur de la pression serait-elle doublée ?

17 Volume d'un gaz

1. Quelle est la valeur du volume occupé par $1{,}5 \times 10^{-2}$ mol d'air dans les conditions habituelles de température de pression : 20 °C et 1013 hPa.

2. Comment évolue la valeur du volume occupé par un gaz lorsque :
a. à pression constante sa température augmente ;
b. à température constante sa pression diminue ;
c. à température et pression constantes on remplace l'air par du dioxyde de carbone.

18 Ballon de baudruche

On introduit dans un ballon de baudruche 2,0 L d'hélium à 25 °C et à une pression de 1,1 bar.

1. Quelle est la quantité de matière d'hélium dans le ballon ?

2. Le ballon éclate lorsque son volume devient supérieur à 3,0 L.
a. Placé sous une cloche à vide reliée à une pompe, quelle sera la valeur de la pression mesurée au moment où le ballon éclate ?



b. À la pression de 1,1 bar, quelle serait la valeur de la température mesurée au moment où le ballon éclate ?
c. Quelle masse d'hélium, à 25 °C et 1,1 bar, faut-il ajouter au ballon pour atteindre ce volume ?

19 Gaz réel – gaz parfait

1. Calculer la quantité de matière de diazote contenue dans un récipient d'un litre à la pression de 1,1 bar et à la température de 25 °C.

2. En déduire le nombre de molécules puis le volume propre des molécules (le volume d'une molécule de diazote est estimé à $7{,}0 \times 10^{-28}$ L).

3. Comparer le volume occupé par les molécules à celui occupé par le gaz. Dans ces conditions, le diazote peut-il être assimilé à un gaz parfait ?

20 Gonflage d'un ballon

Le gonflage d'un ballon de plage présente deux phases : une première au cours de laquelle l'enveloppe du ballon reste souple et le volume du ballon augmente progressivement puis une seconde où le ballon a atteint son volume final et devient plus dur.



1. Indiquer comment varient la masse volumique et la pression de l'air dans le ballon au cours de chaque phase du gonflage à température constante.

2. Valider qualitativement les réponses à partir de l'équation d'état du gaz parfait et de la définition de la masse volumique.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

21 Volume molaire

Le propane et le butane sont deux combustibles couramment utilisés. Ils présentent les caractéristiques suivantes.

	Propane	Butane
Température d'ébullition (sous pression normale : 1 013 hPa)	– 42 °C	– 1 °C
Masse volumique (sous pression normale)	2,0 kg · m^{-3}	2,7 kg · m^{-3}



Bouteilles de propane (rouges) et de butane (bleues)

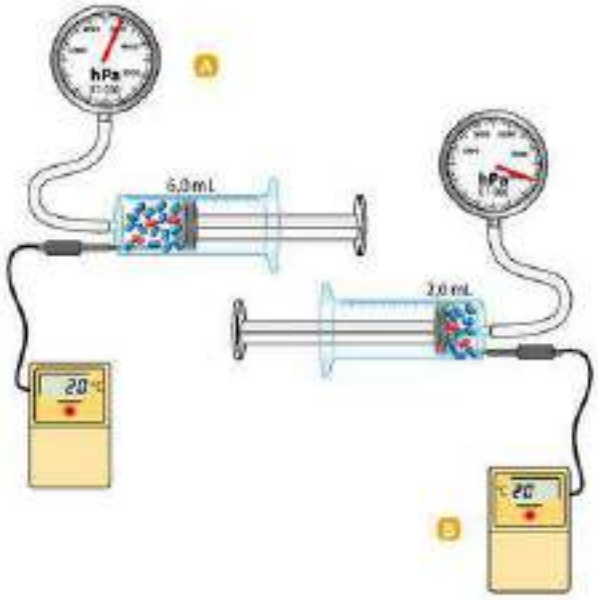
1. Une bouteille contient 1,6 g du propane à la température de 20 °C et à pression normale.
a. Quelle est la valeur du volume occupé par le gaz ?
b. Déterminer la quantité de matière correspondante, le propane étant assimilé à un gaz parfait.
c. En déduire la valeur du volume molaire du propane dans ces conditions.
d. Le volume molaire reste-t-il identique à la température de – 10 °C (et à pression normale) ? Si non, donner sa nouvelle valeur.
2. Le propane est remplacé par du butane. Répondre aux mêmes questions.

22 Validité du modèle du gaz parfait

Dans le but de vérifier la loi de Mariotte, on enferme à la température constante T = 298 K, 18,0 cm^3 d'air initialement à la pression de 1 021 hPa dans une seringue. Des capteurs adaptés mesurent les valeurs de la température et de la pression lors de la compression du gaz dans la seringue. L'air est assimilé à un gaz parfait.

1. Traduire la loi de Mariotte sous la forme d'une expression littérale. Préciser les conditions expérimentales à respecter pour que cette loi soit vérifiée.

2. Deux séries de mesures amènent les valeurs suivantes : V_1 = 6,0 cm^3 ; P_1 = 3 042 hPa ; V_2 = 2,0 cm^3 ; P = 8 950 hPa
a. Pour chaque volume, calculer la valeur théorique de la pression de l'air dans la seringue.
b. Ces valeurs correspondent-elle à celles mesurées expérimentalement ? Proposer une explication.



Faire le point avant d'aller plus loin

PRÉPA BAC

Pour vérifier ses connaissances, répondre aux questions suivantes (sans regarder le cours !)

Décrire le gaz parfait à l'échelle microscopique.

Citer les limites d'application du modèle du gaz parfait.

Écrire la relation liant à température constante, la pression et le volume d'une quantité donnée de gaz parfait. Comment est-elle nommée ?

De quels paramètres dépend le volume molaire d'un gaz ?

Relier les valeurs de la pression et de la masse volumique mesurées aux propriétés microscopiques d'un gaz.

Qu'appelle-t-on température thermodynamique ? Qu'est-ce que le zéro absolu ?

Écrire l'équation d'état du gaz parfait en explicitant chaque grandeur et son unité.

Quel est le lien entre la température thermodynamique et la température Celsius ?

Nommer les grandeurs macroscopiques de description d'un gaz réel et donner leur unité.

Retrouver ces questions en version numérique

Flash PAGE cartes mémos

Exercice résolu EN AUTONOMIE

23 Gonflage d'un ballon de basket-ball

Au basket-ball, à la température habituelle, la pression de l'air dans le ballon doit être comprise entre 1,52 et 1,59 bar.

On souhaite gonfler un ballon de basket-ball à l'aide d'une petite pompe manuelle (figure ci-contre). L'air est assimilé à un gaz parfait.



Données : $R = 8{,}31\ J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ et Le zéro absolu correspond à 0 K et – 273,15 °C.

1. a. **Comparer** les propriétés de l'air contenu dans le ballon et dans le corps de la pompe à l'échelle microscopique.
b. **Expliquer** pourquoi l'air peut être assimilé à un gaz parfait.

2. a. **Calculer** la quantité de matière d'air qu'il contient.
b. **En déduire** le nombre de coups de pompe nécessaire au gonflage.

3. L'échauffement du corps de la pompe conduit progressivement à une augmentation de la température de l'air expulsé. **Expliquer qualitativement** l'effet sur la quantité de matière de gaz contenu dans le volume de la pompe.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- La figure précise les conditions du gonflage.
- Les données indiquent le lien entre la température thermodynamique et la température Celsius.

LES VERBES D'ACTION

- **Comparer** : mettre en regard deux résultats pour en identifier les différences ou les similitudes.
- **Calculer** : effectuer des opérations mathématiques avec des valeurs identifiées et exprimées dans les bonnes unités.
- **Expliquer qualitativement** : donner une justification à une observation ou une affirmation sans faire de calcul.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. a. Le degré d'agitation des molécules est identique mais les molécules étant plus nombreuses par unité de volume dans le ballon, la fréquence des chocs sur les parois du ballon y est plus importante que pour l'air de la pompe.
b. La pression (1,55 bar) est suffisamment faible pour pouvoir négliger toutes les interactions entre les molécules (autre que les chocs).

2. a. $n = \dfrac{P_B \cdot V_B}{R \cdot T}$. **AN** : $n = \dfrac{1{,}55 \times 10^5 \times 7{,}5 \times 10^{-3}}{8{,}31 \times (273 + 21)} = \mathbf{4{,}8 \times 10^{-1}\ mol.}$

b. Pour V_p = 100 mL et P_{atm} = 970 hPa, la quantité de matière d'air contenu dans le corps de la pompe vaut : $n = \dfrac{970 \times 10^2 \times 100 \times 10^{-6}}{8{,}31 \times (273 + 21)} = \mathbf{4{,}0 \times 10^{-3}\ mol.}$

Le nombre de coup de pompe vaut : $\mathbf{N} = 4{,}8 \times 10^{-1} / 4{,}0 \times 10^{-3} = \mathbf{120}$.

3. Une **augmentation de la température** de l'air du corps de la pompe conduit à une **diminution de la quantité de matière** qu'il contient (*n* est inversement proportionnelle à *T* à volume et pression constantes).

QUELQUES CONSEILS

1. b. Penser que le gaz parfait est un modèle applicable aux gaz réels dans certaines conditions seulement.
2. a. Penser à convertir les valeurs des grandeurs dans les bonnes unités.
2. b. Comparer la quantité d'air finale dans le ballon à celle expulsée par la pompe.

EXERCICE SIMILAIRE

24 Réaction explosive

La décomposition explosive de la trinitroglycérine selon l'équation :

$$4\,C_3H_5N_3O_9(l) \rightarrow 12\,CO_2(g) + 10\,H_2O(g) + 6\,N_2(g) + O_2(g)$$

produit une quantité de matière de gaz 7 fois plus importante que celle du réactif consommé. On considère la décomposition à 20 °C d'un volume de 10,0 mL de trinitroglycérine constitué de $7{,}0 \times 10^{-2}$ mol. Le mélange de gaz formé est assimilé à un gaz parfait.



Danger

Données : $R = 8{,}31\ J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$, P_{atm} = 1013 hPa. Le zéro absolu correspond à 0 K et – 273,15 °C.

1. a. En considérant la réaction athermique, calculer la valeur de la pression du mélange de gaz produit et confiné dans le volume initial.
b. Expliquer l'effet de la variation de pression sur la température du gaz.

2. À la pression atmosphérique normale, l'explosion s'accompagne d'une détente du système.
a. Calculer la valeur du volume total occupé par le mélange gazeux à la pression atmosphérique. La comparer à sa valeur initiale.
b. Expliquer qualitativement cette variation à l'échelle microscopique.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

S'entraîner pour maîtriser

SAVOIR RÉDIGER

25 Proposer une correction de la solution proposée par un élève à l'énoncé.

Énoncé

Deux récipients A et B de volume respectifs $V_A = 2{,}0$ L et $V_B = 4{,}0$ L contiennent un gaz parfait à la pression $P = 1{,}0$ bar et à la température $\theta_A = 25$ °C et $\theta_B = 17$ °C. Les deux récipients sont séparés par une paroi amovible.

1. a. Calculer les quantités de matière de gaz dans chaque récipient.
b. Comparer les propriétés du gaz dans chaque récipient à l'échelle microscopique.
2. On retire la paroi entre les deux récipients.
a. Quel est le volume total du système.
b. Déterminer la température finale du gaz.

Solution proposée par un élève

1. a. $n_A = \dfrac{P \cdot V_A}{R \cdot T_A} = \dfrac{1{,}0 \times 10^5 \times 2{,}0}{8{,}314 \times (273{,}15 + 25{,}0)} = 8{,}0724 \times 10^1$ mol

$n_B = \dfrac{P \cdot V_B}{R \cdot T_B} = \dfrac{1{,}0 \times 10^5 \times 4{,}0}{8{,}314 \times (273{,}15 + 17{,}0)} = 1{,}6590 \times 10^2$ mol

Convertir le volume en m^3
Écrire les résultats avec le bon nombre de chiffres significatifs et séparer l'expression littérale de l'application numérique

b. Le degré d'agitation des molécules est plus important dans le récipient A.

Que peut-on déduire de la pression du gaz ?

2. a. $V_f = 6{,}0$ L

b. $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$ donc $T = \dfrac{P \cdot V}{n \cdot R}$ $T = \dfrac{1{,}0 \times 10^5 \times 6{,}0}{8{,}314 \times (165 + 81)} = 293$ °K $= 20{,}4$ °C

Écrire K et non °K

26 Loi d'Avogadro-Ampère HISTOIRE DES SCIENCES

Amedeo Avogadro en 1811 et André-Marie Ampère en 1814 proposent indépendamment l'un de l'autre que : « Des volumes égaux de gaz parfaits différents, contiennent dans les mêmes conditions de température et de pression, le même nombre de molécules ».



Timbre italien émis en 1956 commémorant le décès de A. Avogadro

1. Montrer par un raisonnement qualitatif que l'équation d'état du gaz parfait est en accord avec la loi d'Avogadro-Ampère.

2. a. Calculer le volume molaire de l'air dans les conditions habituelles de température et de pression (20 °C et 1,013 bar).
b. En déduire, dans les mêmes conditions, celui d'une mole de dioxyde de carbone.
c. Quel nombre de molécules contiennent chacun de ces échantillons de gaz ?

3. a. À partir d'un raisonnement à l'échelle microscopique, prévoir l'évolution de la valeur du volume molaire d'un gaz lorsque dans les conditions normales de température et de pression sont atteintes (0 °C et 1,013 bar).
b. Vérifier la prévision par le calcul.

Coups de pouce

- Pour la loi d'Avogadro-Ampère, T et P sont constants.
- Le volume molaire est le volume d'une mole et ne dépend pas de la nature du gaz.

27 Masse volumique d'un gaz parfait



Une masse m d'un gaz parfait de masse molaire M est enfermée à la température T et à la pression P dans un récipient de volume V.

1. a. Exprimer la masse volumique ρ du gaz parfait en fonction de M, P et T.
b. Comment évolue la valeur de la masse volumique d'un gaz parfait lorsque sa température augmente (à pression constante) ? lorsque sa pression augmente (à température constante) ?
c. Interpréter ces évolutions à partir des propriétés du gaz à l'échelle microscopique.

2. Calculer la valeur de la masse volumique de l'air :
a. à 20 °C et sous une pression égale à 1,0 bar ;
b. au sommet de l'Everest sous 0,3 bar et – 40 °C.

3. Comparer, dans les mêmes conditions de température et de pression, les valeurs de la masse volumique de l'air et de l'hélium.

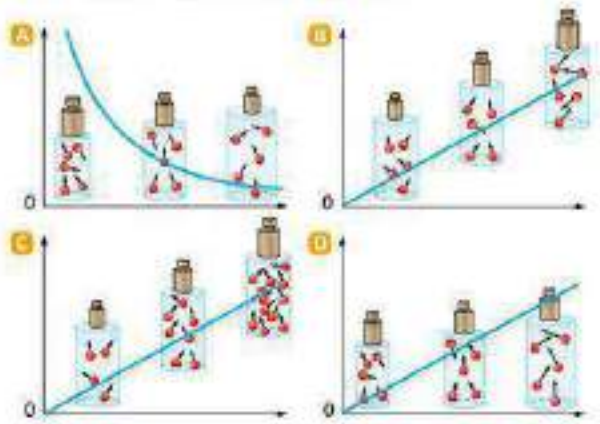
JE VÉRIFIE QUE J'AI...

- la masse volumique ρ est le rapport de la masse m du gaz et le volume V qu'il occupe.
- penser à convertir les températures en Kelvin et les masses molaires en $kg \cdot mol^{-1}$.

28 Les lois du gaz parfait

1. Écrire l'équation d'état du gaz parfait. Préciser la signification de chaque terme et l'unité de chaque grandeur.

2. Pour chaque représentation suivante :



a. Nommer les grandeurs qui sont à porter sur chaque axe des abscisses et des ordonnées.

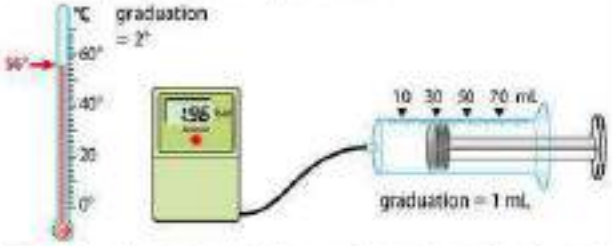
b. Préciser les grandeurs dont la valeur est constante.

c. Écrire la relation du type :

$Y \cdot X$ = constante ou $\frac{Y}{X}$ = constante liant les grandeurs portées en abscisses X et en ordonnées Y.

29 Valeurs d'une pression mesurée

Une quantité $n = 2{,}00 \times 10^{-3}$ mol d'air est enfermé dans le corps d'une seringue graduée. Un thermomètre à liquide et un manomètre à affichage numérique mesurent les valeurs de la température et de la pression.



1. a. Écrire les valeurs de la température θ et du volume V mesurées accompagnées de leurs incertitude-types u_θ et u_v dues à la précision des instruments utilisés (FICHE PRATIQUE ➡ p. 538).

b. Convertir la valeur du volume V en m^3 et celle de la température T en K.

2. On assimile l'air à un gaz parfait.

a. Exprimer la pression P_{GP} du gaz dans la seringue en fonction de T et V.

b. Calculer la valeur P_{GP} de la pression mesurée en bar accompagnée de son incertitude type u_p. On donne :

$$u_p = P \cdot \sqrt{\left(\frac{uT}{T}\right)^2 + \left(\frac{uV}{V}\right)^2}$$

c. En déduire un encadrement de la valeur P_{GP}.

3. a. Relever la valeur P_{GR} de la pression mesurée pour le gaz réel accompagné de son incertitude type u_p. En déduire un encadrement de la valeur P_{GR}.

b. Dans ces conditions de température et de pression, l'air peut-il être assimilé à un gaz parfait ? Justifier la réponse.

30 Modélisation d'une variation

Le tableau ci-dessous rassemble les valeurs de la pression et de la température mesurées pour une quantité $n = 2{,}50 \times 10^{-3}$ mol de gaz contenu dans un volume constant $V = 60{,}0$ mL.

P en hPa	840	920	1 090	1 140	1 290	1 380
θ en °C	– 32,1	– 10,1	21,6	53,6	96,0	122,0

On souhaite vérifier si l'équation d'état du gaz parfait est vérifiée par cet échantillon de gaz.

1. *Tracé du graphe $P = f(T)$.*

Les lignes du programme en langage Python ci-dessous permettent de tracer une courbe. Les compléter avec les valeurs mesurées et les symboles adéquats après avoir réalisé les conversions nécessaires. Écrire et exécuter le programme.

```
#tracé d'une courbe#
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
x = np.array([T1, T2, T3, T4, T5, T6])
y = np.array([P1, P2, P3, P4, P5, P6])
plt.plot(x, y, "+", label="Mesures")
plt.xlim(Tmin, Tmax)
plt.ylim(Pmin, Pmax)
plt.title("Évolution de …")
plt.xlabel("température T en …")
plt.ylabel("pression P en …")
plt.show() # affiche la figure à l'écran
```

2. *Modélisation de la courbe par une fonction linéaire*

Compléter le programme précédent par les lignes suivantes (les intercaler entre la dernière et l'avant dernière lignes) :

```
#Modélisation d'une courbe#
from scipy.stats import linregress
(a,b,c,d,e)=linregress(x,y)
plt.plot(x,a*x+b, "b",label="P=a*T+b "
         +"a="+str(round(a,1))+" Pa.K-1"
         +"  b="+str(round(b,1))+" Pa")
print ("a="+str(round(a,1))+"b"+str(round(b,1)))
plt.legend()
```

Exécuter le programme et relever les valeurs des coefficients du modèle mathématique obtenu.

3. Pour conclure, indiquer si l'échantillon de gaz peut être assimilé à un gaz parfait. Justifier la réponse.

31 Pression de gonflage

Les pneus d'un véhicule doivent être gonflés à une juste pression afin de pouvoir assurer leur rôle. Il est conseillé d'effectuer un contrôle de la pression à froid c'est-à-dire après un parcours de quelques kilomètres seulement. En effet, à chaud, l'écart de pression peut atteindre 0,3 bar.

L'air est assimilé à un gaz parfait.

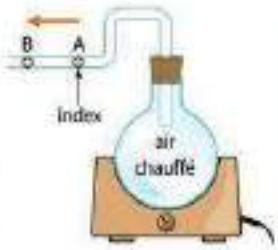
1. a. Expliquer l'effet de l'échauffement du pneu sur les valeurs des grandeurs macroscopiques (P, T et ρ) qui caractérisent l'air qu'il contient.

b. À partir de l'équation d'état du gaz parfait, justifier qualitativement la valeur de la pression mesurée à chaud

c. À froid (à 20 °C), la pression de gonflage d'un pneu de 16 L est ajustée à 2,5 bar. Déterminer la valeur de la température de l'air à chaud dans le pneu.

2. Interpréter à l'échelle microscopique les variations (ou non) des valeurs des grandeurs macroscopiques.

32 Dilatation d'un gaz



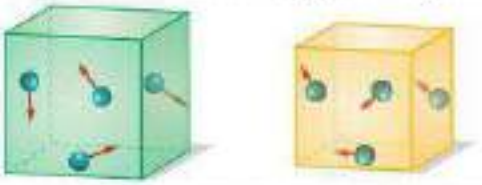
Initialement en position A, l'index (une gouttelette d'eau colorée) du dispositif ci-contre se déplace jusqu'en B lorsque de l'énergie thermique est apportée au système (de l'air) par chauffage.

Données : *$P = 1{,}0 \times 10^5$ Pa ; $M_{air} = 29$ g · mol^{-1}, diamètre du tube effilé : $d = 7{,}0$ mm. État du système à l'état initial (index en A) :* $\theta = 19{,}0$ °C, $V = 250$ mL, $\rho = 1{,}2$ kg · m^{-3}.

1. a. Quelles sont les grandeurs macroscopiques caractéristiques du gaz dont la valeur a été modifiée entre l'état initial et l'état final du système ?

b. Quelle est la valeur de la variation de température du gaz dans le ballon lorsque l'index se déplace de 2,0 cm vers la gauche ?

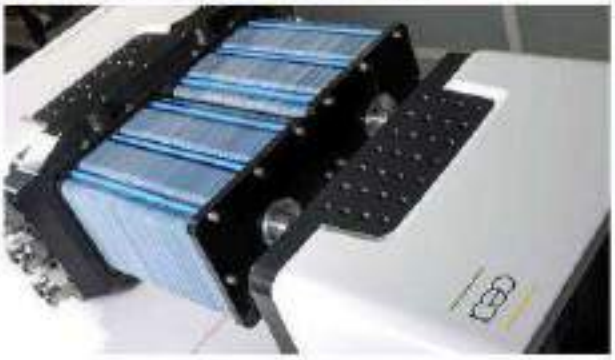
2. a. Attribuer l'une des représentations microscopiques ci-dessous aux deux états macroscopiques du système.



b. Justifier chaque réponse à partir des propriétés du gaz à l'échelle microscopique.

33 The GENÉPAC battery

The GENÉPAC battery is a fuel cell that, powered in 2009, a yacht participating in the "Zero CO2" project.



The GENEPAC battery: Electric Fuel Cell Battery Generator.

Its principle uses a controlled chemical reaction between dihydrogen and the dioxygen in the air to produce electricity, water and heat. Hydrogen is stored on board in the form of compressed gas at a pressure of 700 bar, the volume of the tank is $V = 15.0$ L. When the hydrogen reservoir is full, the mass of available hydrogen is 3.0 kg.

1. Calculate the amount hydrogen (H_2) in the full tank.

2. Dihydrogen is a perfect gas. Determine:

a. the volume V_0 of dihydrogen, in usual conditions of pressure (1 013 hPa) and temperature (20 °C), which had to be compressed to fill the reservoir;

b. the corresponding volume to 20 °C and the pressure of 700 bar.

3. Compare this last value to the actual tank volume. Draw a conclusion on the model of the perfect gas.

À L'ORAL

34 Cinétique d'une réaction

Le suivi de la cinétique de la réaction entre le luminol $C_8H_7N_3O_2$ et l'eau oxygénée H_2O_2 d'équation :

$$2\ C_8H_7N_3O_2\ (aq) + 7\ H_2O_2\ (aq) + 4\ OH^-\ (aq) \rightarrow 2\ N_2\ (g) + 2\ C_8H_2NO_4^{2-}\ (aq) + 14\ H_2O\ (l)$$

amène le graphique suivant.

Données :

$V_{gaz} = 2{,}1$ L ; $\theta = 27$ °C *Pression initiale :* $P = 1$ atm

$n_{initial}(H_2O_2) = 4{,}9 \times 10^{-3}$ mol *Réactif limitant :* H_2O_2

$x_f = 7{,}0 \times 10^{-4}$ mol



Élaborer un exposé oral de quelques minutes présentant :
- l'acquisition qui a été faite ;
- le protocole expérimental qui a pu être mis en œuvre pour l'obtenir ;
- le raisonnement qui a permis de déterminer la valeur de l'avancement final x_f.
- l'explication microscopique du phénomène observé.

Les mots-clés à utiliser

- modèle du gaz parfait
- équation d'état du gaz parfait
- pression finale
- température thermodynamique
- quantité de matière
- agitation thermique

35 RETOUR SUR LA PAGE D'OUVERTURE

Les montgolfières sont les premiers aéronefs ayant permis de s'élever dans l'atmosphère.



Préparer un exposé oral qui explique pourquoi le chauffage du volume de l'air du ballon permet le décollage de la montgolfière.

Développer ses compétences

37 Valider l'équation d'une réaction chimique

RÉSOLUTION DE PROBLÈME

40 min

ANALYSE Proposer une stratégie de résolution

L'eau de Javel est un produit courant et bon marché. Elle se décompose lentement selon une transformation totale que l'on cherche ici à valider.

DOC 1 Décomposition de l'eau de Javel

L'eau de Javel est une solution aqueuse contenant entre autres des ions hypochlorite ClO^- (aq) et des ions chlorure Cl^- (aq). Outre ses propriétés désinfectantes (c'est un bactéricide puissant), elle est utilisée pour son pouvoir «blanchissant», lié à l'action oxydante de l'ion hypochlorite sur de nombreux colorants.

L'eau de Javel se décompose lentement selon une transformation totale modélisée par la réaction d'équation :

$$2\,ClO^-(aq) \rightarrow 2\,Cl^-(aq) + O_2(g)$$

DOC 2 Suivi de la cinétique de la transformation

Pour suivre l'évolution de cette transformation, on dilue une solution commerciale S_0 afin d'obtenir un volume $V = 250$ mL d'une solution S_1 d'eau de Javel diluée dix fois. On verse un volume $V_1 = 20{,}0$ mL de la solution S_1 dans un ballon.

À l'instant de date $t_0 = 0$ s où l'on déclenche le chronomètre, on ajoute, sans variation de volume, une pointe de spatule de chlorure de cobalt dans la solution et on bouche le ballon. L'ion cobalt Co^{2+} (aq) est un catalyseur de la réaction.

Pour suivre l'évolution de la transformation qui se déroule, on mesure, avec un dispositif adapté, la pression P du gaz dans le ballon.

DOC 3 Évolution des valeurs de la pression mesurée



DONNÉES

- On néglige la quantité de dioxygène dissoute dans l'eau par rapport à la quantité de dioxygène produite.
- La concentration molaire en ions hypochlorite de la solution commerciale $c_0 = 1{,}03$ mol · L^{-1}.
- La température est maintenue constante $\theta = 23$ °C.
- Au cours de la transformation les gaz peuvent occuper un volume $V_0 = 275$ mL dans le ballon.
- $R = 8{,}314$ Pa · m^3 · mol^{-1} · K^{-1}
- 0 °C = 273 K

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Identifier les gaz présents dans le ballon à l'état initial et à l'état final de la transformation. Peuvent-ils être assimilés à un gaz parfait ?
2. Calculer la variation de pression au cours de la transformation chimique.
3. Déterminer la valeur de la quantité de matière de dioxygène gazeux qui doit théoriquement se former.

PROBLÉMATIQUE

Les valeurs de la pression mesurée au cours de la transformation permettent-elles de valider l'équation de la réaction totale modélisant la décomposition de l'eau de Javel ?

Il est attendu une prise d'initiatives et une présentation de la démarche suivie même s'il elle n'a pas abouti.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

38 Le ballon météorologique

DÉMARCHES DIFFÉRENCIÉES

30 min

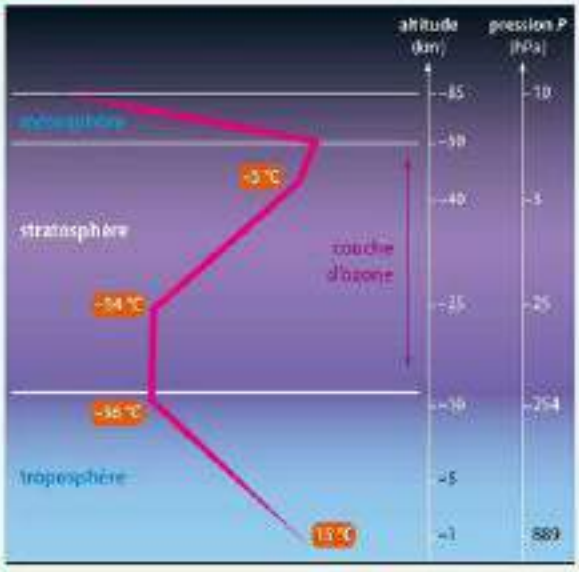
ANALYSE Proposer une stratégie de résolution

Un ballon sonde gonflé à l'hélium doit atteindre la couche d'ozone stratosphérique.

DOC 1 Lancement du ballon-sonde



DOC 2 Structure de l'atmosphère



DÉMARCHE EXPERTE

Le ballon sonde permet-il aux capteurs d'atteindre les couches supérieures de la couche d'ozone.
Si non, estimer la valeur de l'altitude maximale atteinte dans la stratosphère.

DÉMARCHE AVANCÉE

1. a. Estimer la quantité de matière d'hélium dans le ballon.
b. Le ballon peut-il atteindre cette altitude sans éclater ? Justifier la réponse.

2. Calculer la valeur de la pression de l'hélium au moment où le ballon éclate, pour une température égale à – 56 °C puis à 5 °C. Conclure en estimant l'altitude maximale atteinte par le ballon.

DONNÉES

- $V_{sphère} = \frac{4}{3}\pi R^3$.
- La pression de l'air à extérieur du ballon est toujours égale à celle de l'hélium à l'intérieur.
- L'hélium est assimilé à un gaz parfait.
- L'enveloppe élastique ne peut pas dépasser un volume 6 fois supérieur à sa valeur initiale sans éclater.

VERS LE SUP'

39 Plongée en apnée

TABLEUR-GRAPHEUR

Données : $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}\ mol^{-1}$; $R = 8{,}31\ J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$; $M_O = 16{,}0\ g \cdot mol^{-1}$, $M_N = 14{,}0\ g \cdot mol^{-1}$; *Composition de l'air : 79 % de diazote et de 21 % de dioxygène ;* $\rho_{eau} = 1\,000\ kg \cdot m^{-3}$; $g = 9{,}81\ m \cdot s^{-2}$

À la surface de l'eau, un ballon est rempli d'air : $V_0 = 1{,}0$ L, $P_0 = 1{,}00 \times 10^5$ Pa. Des mesures révèlent l'évolution de la pression P dans le ballon et du rapport $\alpha = \frac{P \cdot V_m}{R \cdot T_0}$ (où V_m représente le volume molaire et où la température est constante et égale à $\theta_0 = 15$ °C) lors de la descente.

1. a. Calculer la masse molaire M_{air} de l'air.
b. Déterminer le volume molaire V_{m0} de l'air et la densité ρ_{air} à θ_0 et P_0.
c. En déduire la masse m_{air} d'air et la quantité de matière n_{air} contenu dans le ballon.

2. a. Déterminer le volume V du ballon à la profondeur $z = 11\,000$ m.

Mesures expérimentales : caractéristiques de l'air

P (bar)	1,00	100	150	200	250	300
α	0,945	0,981	0,997	1,025	1,064	1,109
P (bar)	350	400	500	600	700	
α	1,157	1,212	1,333	1,452	1,575	

b. Si, à cette profondeur, le ballon se perce, que devrait-on observer ? En réalité des bulles d'air remontent à la surface. Quelle est l'hypothèse à remettre en cause ?

3. a. Démontrer l'expression :

$$\rho_{air} = \frac{P \cdot M_{air}}{\alpha \cdot R \cdot T_0}$$

b. À l'aide d'un tableur, tracer la courbe $\rho_{air} = f(P)$ et celle obtenue en appliquant le modèle du gaz parfait au calcul de la masse volumique ρ_{air}.
c. L'étude des plongées en apnée peut-elle se faire en assimilant l'air dans l'organisme à un gaz parfait ?

Vitesse de corrosion des gouttières

Contexte

L'objectif est d'évaluer la vitesse volumique de disparition du zinc en étudiant par pressiométrie la cinétique d'une transformation réalisée au laboratoire..

Documents mis à disposition

Les pluies acides

Les précipitations sont acides en raison des rejets du dioxyde de carbone du dioxyde de soufre et des oxydes d'azote qui s'associent à l'humidité de l'air. Ces acides formés sont transportés loin de leur source avant d'être précipités par les pluies, le brouillard, la neige ou sous forme de dépôts secs. Très souvent, les pluies s'écoulant des toits sont recueillies par des gouttières métalliques, constituées de zinc.

Modélisation de la corrosion du zinc

Le zinc Zn (s) réagit en milieu acide selon l'équation :

$$Zn\,(s) + 2\,H_3O^+\,(aq) \rightarrow Zn^{2+}\,(aq) + H_2\,(g) + 2\,H_2O\,(l)$$

L'avancement x de la réaction est égal à la quantité $n(H_2)$ de dihydrogène formé.

En assimilant le dihydrogène libéré à un gaz parfait, la surpression $(P - P_i)$ produite dans un récipient clos est à chaque instant proportionnelle à la quantité $n(H_2)$ de dihydrogène formé et inversement proportionnelle au volume V_{gaz} de gaz (où P_i est la pression mesurée à la date $t = 0$ s).

Dispositif expérimental de suivi cinétique par pressiométrie

La pressiométrie permet de suivre l'évolution temporelle d'un système chimique.

Dans le dispositif suivant, le volume de gaz V_{gaz} est fixé.

Si une espèce chimique gazeuse est produite, la pression va évoluer au cours du temps.



Données : *$M(Zn) = 65{,}4\ g \cdot mol^{-1}$. Loi du gaz parfait : $PV = nRT$ avec $R = 8{,}31\ J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$. Vitesse volumique de disparition du zinc :* $v = -\frac{1}{V}\frac{dx}{dt}$ *; V : volume de la solution (supposé constant durant l'expérience) et x l'avancement de la réaction.*

Matériel mis à disposition

- Une calculette type « collège »
- Un ordinateur et un logiciel tableur-grapheur
- Un erlenmeyer de 250 mL et un bouchon adapté et percé
- Un entonnoir tulipe avec robinet
- Un capteur de pression relié à un tuyau souple
- Un chronomètre et un thermomètre
- Une balance au centième de gramme
- Une éprouvette de 50 mL
- Une solution d'acide chlorhydrique $c_a = 0{,}50\ mol \cdot L^{-1}$
- Un échantillon de poudre de zinc Zn (s) de 0,5 g
- Des paires de lunettes de sécurité et de gants

Travail à effectuer

1. (ANA) (RAI) **Proposition de protocole expérimental** *(20 min conseillées)*

■ Proposer une stratégie permettant de représenter graphiquement l'évolution de l'avancement x de la réaction modélisant la transformation complète de l'échantillon zinc fourni.

Être en mesure de présenter le protocole

2. (REA) **Mise en œuvre du protocole expérimental proposé** *(20 min conseillées)*

■ Mettre en œuvre le protocole précédemment validé et noter les valeurs des mesures effectuées pendant une durée totale d'environ 5 minutes. Représenter alors l'évolution de la pression mesurée en fonction du temps.

Être en mesure de présenter l'acquisition et le traitement informatique réalisé

3. (REA) (VAL) **Exploitation du résultat obtenu** *(20 min conseillées)*

■ À l'aide du tableur, créer la grandeur avancement x puis représenter son évolution en fonction du temps. Comment peut-on déduire de la courbe obtenue la valeur initiale de la vitesse volumique de disparition du zinc ? Estimer cette valeur. Commenter le résultat obtenu en portant un regard critique sur la méthode employée.

Fermer les logiciels et ranger la paillasse avant de quitter la salle.

PISTE POUR LE GRAND ORAL PRÉPA BAC

Pour se préparer à l'Oral
➥ Livret LES CLÉS DU BAC
(en début de manuel)

UNE QUESTION

Comment développer un ballon météorologique ?

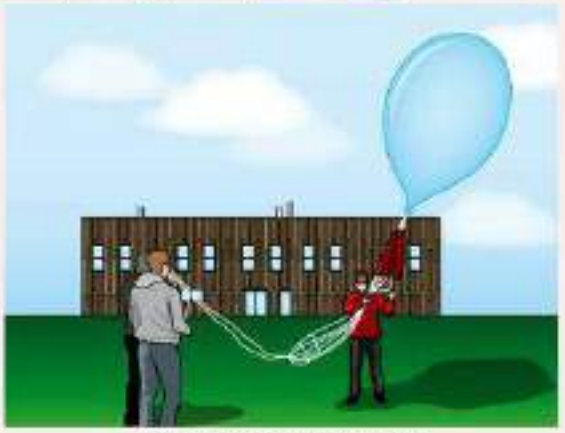
Enjeu de la question

La conception et la réalisation des ballons sondes permet de se renseigner sur l'évolution des grandeurs physiques qui caractérisent l'atmosphère en atteignant les couches supérieures de celle-ci.

Proposition de plan de présentation

1. Structure de l'atmosphère et grandeurs macroscopiques : température, pression, masse volumique en fonction de l'altitude.
2. Principe du ballon sonde (fonctionnement, composition...)
3. Cahier des charges d'un ballon stratosphérique (altitude visée, dimensions et gaz de remplissage, caractéristiques et organisation de la nacelle ...)
4. Instrumentation embarquée (microcontrôleur et capteurs, programmes, transmission ou stockage des données)
5. Conclusion : un projet envisageable au lycée

Exemple de support de présentation



Lancement d'un ballon sonde

Les mots-clés

pression › température › masse volumique › équation d'état du gaz parfait › programmation

QUESTIONS D'APPROFONDISSEMENT POSSIBLES



UN EXEMPLE DE PROJET PROFESSIONNEL

Ces dernières années, des phénomènes météorologiques de fortes intensités ont été observés : cyclones, ouragans, tempêtes, avalanches, inondations..... Leur prévision présente un intérêt majeur pour la protection des populations, des biens et des infrastructures. Les métiers relatifs à la **météorologie** et au **climat** sont donc essentiels.

Après le bac : *Bac + 5 diplôme d'ingénieur de l'école nationale de la météorologie.*
Autres métiers : *climatologue, technicien des métiers de la météorologie, Glaciologue, géochimiste.*

Spécialisé dans les phénomènes atmosphériques, **le météorologue** analyse les causes et les effets des changements climatiques. Il est chargé de réaliser des prévisions et d'anticiper les risques à partir de modélisations informatiques et d'informations fournies par des satellites, des stations météo, des ballons sondes.



Premier principe

Avant d'aborder le chapitre EN AUTONOMIE

LES ACQUIS INDISPENSABLES

1re Enseignement de spécialité · 1re Enseignement scientifique

Énergie mécanique

$E_m = E_c + E_p$

E_m : énergie mécanique (en J) ; E_c : énergie cinétique (en J) ; E_p : énergie potentielle (en J)

Théorème de l'énergie cinétique

$\Delta E_c = E_c(B) - E_c(A) = \sum W_{AB}(\vec{F})$

ΔE_c : variation d'énergie cinétique (en J) ; $\sum W_{AB}(\vec{F})$: somme des travaux des forces (en J)

Puissance et énergie

$E = P \cdot \Delta t$

E : énergie utilisée ou fournie par un dipôle (en J) ; P : puissance utilisée ou fournie par le dipôle (en W) ; Δt : durée d'utilisation (en s)

Bilan radiatif

Le **bilan radiatif** terrestre se traduit par la différence entre l'énergie solaire reçue par la Terre et l'énergie émise vers l'espace. L'**albédo** et l'**effet de serre** ont une influence sur la température de la planète.

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

Pour chaque situation, rédiger une réponse qui explique en quelques lignes le raisonnement.

Flash PAGE

SITUATION 1

Pendant leur course d'élan les bobeurs poussent le bobsleigh sur une piste rectiligne et horizontale.

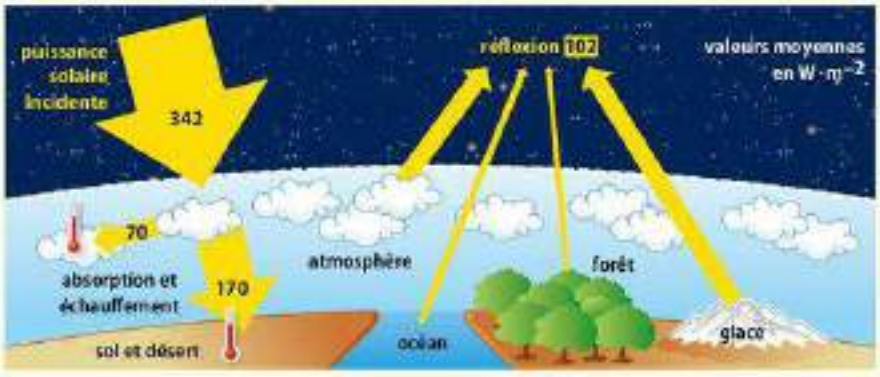
Quelle énergie est acquise par le bobsleigh lors de cette phase ? D'où provient-elle ?



SITUATION 2

L'albédo correspond à la proportion de l'énergie reçue par la Terre qui est réfléchie. Le document ci-dessous traduit le devenir du rayonnement solaire reçu par la Terre.

Déterminer la valeur de l'albédo terrestre.



CHAPITRE

16

PHYSIQUE

de la thermodynamique



La température moyenne terrestre est de 15 °C. Comment la déterminer théoriquement et quels sont les paramètres à intégrer au modèle pour l'estimer ?

→ EXERCICE 1

NOTIONS ET CONTENUS

- Énergie interne d'un système.
- Premier principe de la thermodynamique.
- Transfert thermique : capacité thermique, modes de transferts thermiques.
- Flux thermique : sens de transferts thermiques, résistance thermique.
- Température terrestre moyenne : loi de Stefan-Boltzmann, albédo et effet de serre.
- Système en contact avec un thermostat : loi de Newton, évolution de la température.

CAPACITÉS EXPÉRIMENTALES

- Effectuer l'étude énergétique d'un système thermodynamique. → Activité 2
- Suivre et modéliser l'évolution de la température d'un système incompressible. → Activité 4 → Pour préparer l'ECE

CAPACITÉS MATHÉMATIQUES

- Résoudre une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants avec un second membre constant. → Activité 4

1. ACTIVITÉ DE DÉCOUVERTE

CLASSE INVERSÉE

COMPÉTENCES :
APP Rechercher et organiser l'information utile
COM Utiliser un vocabulaire adapté

Modes de transfert thermique

Un système dont la température évolue échange de l'énergie avec l'extérieur sous forme de transfert thermique. Comment ce transfert thermique peut-il s'effectuer ?

DOC 1 Conduction thermique

Une casserole en contact avec une plaque électrique s'échauffe. Au niveau microscopique, l'agitation thermique se transmet de proche en proche. Pour comprendre le phénomène de conduction au niveau microscopique, le recours à une animation peut être utile.



ANIMATION
Conduction thermique

DOC 2 Convection thermique

Mouvements de l'air, des liquides... le phénomène de convection thermique est un mode de transfert lié aux mouvements de la matière. Pour le comprendre, le recours à une animation peut être utile.



ANIMATION
Convection thermique

DOC 3 Les trois modes de transferts thermiques

La conduction thermique

L'énergie thermique, du fait de l'agitation thermique au niveau microscopique, se transmet de proche en proche sans transport de matière.

La convection thermique

L'énergie thermique se transmet de proche en proche dans la matière avec déplacement de celle-ci.

Le rayonnement

L'énergie thermique est transmise sans support de matière par rayonnement.

DOC 4 Situations du quotidien

Une casserole d'eau sur une plaque électrique



Un plat réchauffé par un four à micro-ondes



Une pièce chauffée par un radiateur



L'eau d'une piscine en été



EXPLOITATION ET ANALYSE

1 a. Décrire les mouvements des particules de matière :
- lors d'une convection thermique ;
- lors d'une conduction thermique.

2 Quelle est la particularité d'un transfert thermique par rayonnement ?

SYNTHÈSE

En vous basant sur les documents mise à disposition, identifier le (ou les) transfert(s) thermique(s) mis en jeu dans différentes situations de la vie courante.

Je réussis si...

- **Je sais caractériser et identifier les trois modes de transferts thermiques.**

TP

COMPÉTENCES
REA Mettre en œuvre un protocole expérimental
VAL Interpréter des mesures

Capacité thermique

La capacité thermique traduit la capacité de chaque matériau, chaque système à stocker de l'énergie interne et à la restituer lors d'un transfert thermique. Comment la déterminer ?

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

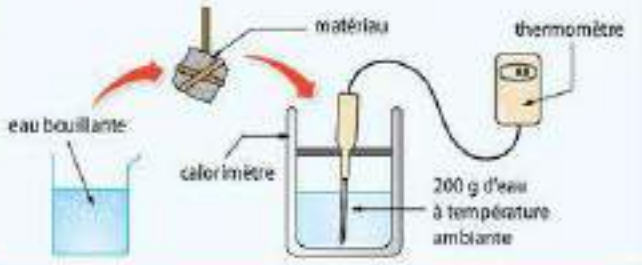
Déterminer la capacité thermique d'un calorimètre

- Verser 200 g d'eau initialement chauffée à une température T_c dans 100 g d'eau à température ambiante T_{amb} contenue dans un calorimètre.
- Mélanger puis agiter le contenu du calorimètre dont le couvercle est fermé jusqu'à ce que la température finale T_{finale} se stabilise.
- Si le calorimètre est parfaitement isolé, le système (eau + calorimètre) n'échange aucune énergie avec l'extérieur.

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Déterminer la capacité thermique d'un matériau

- Placer une masse m de ce matériau initialement plongé dans une eau bouillante à 100 °C dans 200 g d'eau à température ambiante T_{amb} contenue dans un calorimètre.
- Mélanger puis agiter le contenu du calorimètre dont le couvercle est fermé jusqu'à ce que la température finale T_{finale} se stabilise.
- L'énergie reçue alors par le système (eau + calorimètre) provient du matériau.



DOC 1 Dispositif expérimental



VOCABULAIRE

- **Transfert thermique :** transfert d'énergie entre le système et l'extérieur qui se traduit par une variation de température.
- **Énergie interne :** énergie propre du système.

DOC 2 Transfert thermique, capacité et variation de l'énergie interne

Pour un système incompressible, la variation d'énergie interne (U) s'écrit : $\Delta U = Q$

transfert thermique (J) → $Q = C \cdot \Delta T$ ← variation de température (K)

$Q = C \cdot \Delta T$: capacité thermique ($J \cdot K^{-1}$)

transfert thermique (J) → $C = m \cdot c$ ← capacité thermique massique ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)

$C = m \cdot c$: masse (kg)

Capacité thermique de l'eau : $c_{eau} = 4{,}18\ J \cdot g^{-1} \cdot °C^{-1}$

EXPLOITATION ET ANALYSE

1 Détermination de la capacité thermique du calorimètre

a. Réaliser le protocole expérimental permettant de déterminer la capacité thermique du calorimètre C_{calo} en prenant soin de noter les valeurs de T_{amb}, T_c et T_{finale}.

b. Effectuer l'étude énergétique du système (eau + calorimètre).

c. En déduire la valeur de C_{calo}.

2 Détermination de la capacité thermique d'un matériau

a. Réaliser le protocole expérimental permettant de déterminer la capacité thermique massique d'un matériau c_{mat} en prenant soin de noter les valeurs de T_{amb}, T_c et T_{finale}.

b. Effectuer l'étude énergétique du système (eau + matériau + calorimètre).

c. En déduire la valeur de c_{mat}.

CONCLUSION

Donner les capacités thermiques massiques des différents matériaux utilisés.

Avoir un regard critique sur les incertitudes de mesures.

Je réussis si...

- **Je sais mettre en œuvre un protocole expérimental pour déterminer une capacité thermique.**
- **Je sais effectuer l'étude énergétique nécessaire à la détermination d'une capacité thermique.**

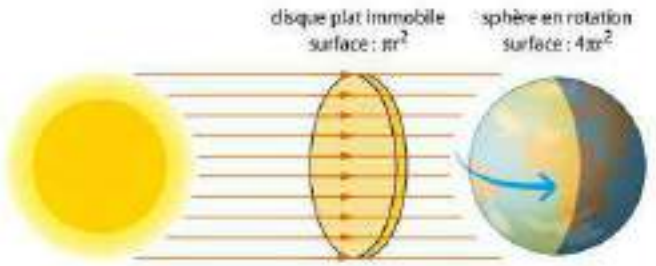
COMPÉTENCES :
(RÉA) Utiliser un modèle
(VAL) Confronter un modèle à des résultats expérimentaux ou à un modèle

Température terrestre moyenne

La moyenne de la température sur toute la surface de la Terre (surfaces émergées et océans, mers et lacs) est de 15 °C. Comment estimer cette valeur de température ?

DOC 1 Flux thermique reçu du Soleil par unité de surface

Le flux thermique reçu au sommet de l'atmosphère terrestre par le Soleil par unité de surface perpendiculaire aux rayons solaires (ou constante solaire) est connu. Il vaut en moyenne $F = 1\,368\ W \cdot m^{-2}$. Il se répartit sur la totalité de la surface de la Terre où sa valeur est $F' = 342\ W \cdot m^{-2}$.



DOC 2 Loi de Stefan-Boltzmann

Tout corps de température non nulle perd de l'énergie par rayonnement. La loi de Stefan-Boltzmann définit la relation qui existe entre le flux thermique par unité de surface d'un objet et la température de l'objet considéré comme un « corps noir » :

Loi de Stefan-Boltzmann

$F = \sigma \cdot T^4$

- F : flux thermique par unité de surface ($W \cdot m^{-2}$)
- T : température du « corps noir » (K)
- $\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}$ SI

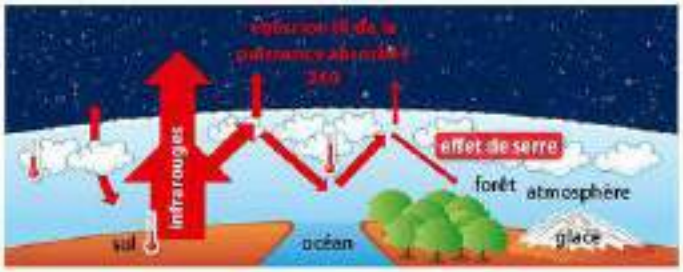
DOC 3 Albédo terrestre

L'albédo correspond à la proportion de l'énergie reçue par la Terre qui est réfléchie et n'est donc pas absorbée.



DOC 4 Effet de serre

L'effet de serre est un phénomène naturel de réchauffement d'une planète, provoqué par les gaz de son atmosphère qui absorbent une partie du rayonnement infrarouge émis par le sol.



DONNÉE

- $T(K) = \theta(°C) + 273$

VOCABULAIRE

- Le **flux thermique** désigne la puissance thermique.
- Le **corps noir** est un corps idéal qui émet sous forme d'un rayonnement tout l'énergie qu'il reçoit.

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1 Déterminer l'unité de la constante σ présente dans la loi de Stefan-Boltzmann.

2 a. Quel est le rapport entre le flux thermique surfacique F reçu du Soleil au niveau de la Terre et la constante solaire F ?

b. Expliquer la valeur de ce rapport.

PROBLÉMATIQUE

On peut estimer que la température terrestre moyenne est globalement stable et donc dire que le flux thermique reçu du Soleil est égal au flux thermique émis par la Terre.

Déterminer, en détaillant la démarche suivie, la température moyenne terrestre théorique et expliquer l'écart entre cette valeur théorique et la valeur réelle.

Je réussis si...

- **Je sais écrire le bilan énergétique.**
- **Je sais utiliser la loi de Stefan-Boltzmann.**

TP

COMPÉTENCES :
(RÉA) Utiliser un modèle
(VAL) Confronter un modèle à des résultats expérimentaux

Loi de refroidissement de Newton

Une boisson chaude laissée à l'air libre refroidit jusqu'à atteindre la température ambiante. Peut-on décrire ce processus par un modèle mathématique et prédire la durée du refroidissement ?

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Afin d'effectuer l'expérience sur une durée la plus courte possible, on utilise une petite quantité d'eau qu'on prend à une température de plusieurs dizaines de °C au-dessus de la température ambiante.

- Mettre l'eau dans un récipient et porter sa température à 100°.
- Relier le capteur de température à un ordinateur et plonger le capteur dans l'eau chaude.

DOC 1 Dispositif expérimental



DOC 2 L'hypothèse de Newton

Issac Newton a fait l'hypothèse que le taux de variation de température d'un corps qui se refroidit est proportionnel à la différence de température entre le corps et la température ambiante :

$$dT/dt = -\gamma \cdot (T - T_{amb})$$

À partir de cette hypothèse, il a montré que l'évolution de la température d'un corps décrit une exponentielle décroissante selon l'équation :

$$T = (T_0 - T_{amb}) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + T_{amb}$$

Avec $(T_0 - T_{amb})$ différence initiale de température.



MESURES

1 Après avoir mesuré la température ambiante, effectuer l'acquisition de l'évolution de la température d'un échantillon d'eau, initialement chauffé, laissé à l'air libre en fonction du temps.

ANALYSES

2 a. Modéliser la courbe d'évolution de la température obtenue par une exponentielle de type : $T = A \cdot e^{-C \cdot t} + B$.

b. Faire correspondre les variables A, B et C aux termes de l'expression donnée par Newton.

3 a. Utiliser l'équation pour calculer la température au bout de 15 min de refroidissement. Comparer le résultat à la valeur mesurée.

b. Utiliser l'équation pour prédire la durée nécessaire pour que l'eau atteigne une température supérieure de 1 °C à la température ambiante.

CONCLUSION

Comment évolue la température d'un corps, initialement chauffé, laissé à l'air libre ?

Si la différence de température initiale entre le corps et l'air est deux fois plus faible, la durée de refroidissement est-elle deux fois plus courte ?

Je réussis si...

- **Je sais faire l'acquisition de mesures.**
- **MATHS Je sais modéliser la courbe expérimentale obtenue.**
- **Je sais utiliser la loi de Newton pour prédire une température ou une durée de refroidissement.**

1 Premier principe de la thermodynamique

Notion d'énergie interne

Lorsqu'on effectue une étude énergétique, il est nécessaire de définir l'objet sur lequel porte l'étude. Cet objet est appelé système.

L'**énergie interne** d'un système est son énergie propre. Elle correspond à la **somme de toutes les énergies** qui existent, à l'intérieur de ce système, au niveau microscopique du fait de ses constituants (FIG. 1).



FIG. 1 L'eau contenue dans cette casserole peut être considérée comme un système. Du fait de l'agitation des molécules d'eau et des interactions qui existaient entre elles, ce système possède une énergie interne.

Aspect microscopique

Étant donné la complexité d'appréhender le comportement de toutes les particules qui constituent un système, l'énergie interne n'est pas directement calculable. On pourra néanmoins déterminer sa variation.

L'énergie interne, notée U, ou sa variation notée ΔU, s'exprime, comme toute énergie, **en joule (J)**.

Contributions microscopiques

Les énergies présentes au niveau microscopique sont les énergies cinétiques microscopiques et les énergies potentielles d'interactions microscopiques.

Les **énergies cinétiques microscopiques** sont liées à **l'agitation thermique** des particules qui constituent le système (FIG. 2). Elles augmentent avec la température du système.

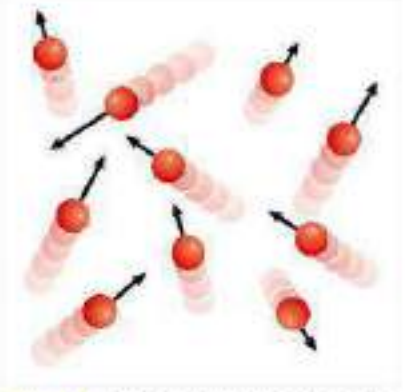


FIG. 2 L'agitation thermique désordonnée des entités microscopiques d'un système contribue à l'existence de l'énergie interne de celui-ci.

EXEMPLE

Dans l'air, les molécules de dioxygène ont une vitesse de moyenne de $4{,}6 \times 10^2\ m \cdot s^{-1}$ à 0 °C et de $5{,}0 \times 10^2\ m \cdot s^{-1}$ à 20 °C. Leur énergie cinétique microscopique augmente avec la température.

Les **énergies potentielles d'interaction** sont liées aux **interactions** entre les particules qui constituent le système. Elles peuvent être des interactions intramoléculaires ou intermoléculaires (FIG. 3).



FIG. 3 Les interactions qui existaient au niveau microscopique entre les molécules constituant un système contribue à l'existence de l'énergie interne de celui-ci.

EXEMPLE

Les interactions entre les nucléons d'un noyau atomique, les interactions entre les atomes d'une molécule ou les interactions entre les molécules contribuent à l'existence d'énergies potentielles d'interaction.

Énergie totale d'un système

Un système peut aussi s'il est en mouvement posséder une énergie cinétique ou s'il est en hauteur une énergie potentielle de pesanteur.

L'**énergie totale** d'un système est la somme de son énergie cinétique, de son énergie potentielle de pesanteur et de son énergie interne :

$$E_{tot} = E_c + E_{pp} + U$$

- E_{tot} : énergie totale (J)
- E_c : énergie cinétique (J)
- E_{pp} : énergie potentielle de pesanteur (J)
- U : énergie interne (J)

Un système au repos à l'échelle macroscopique a une énergie macroscopique constante : $E_c + E_{pp}$ = **constante**

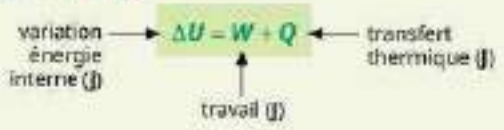
La variation d'énergie totale d'un **système au repos à l'échelle macroscopique** est égale à sa variation d'énergie interne.

$$\Delta E_{tot} = \Delta U$$

Premier principe de la thermodynamique

On considère dans la suite que le système est au repos à l'échelle macroscopique et qu'il est **fermé** autrement dit qu'il n'échange pas de matière avec l'extérieur.

Le **premier principe de la thermodynamique** indique que si un système fermé au repos a son énergie qui varie c'est qu'il échange avec l'extérieur de l'énergie soit sous forme de **travail** (W) soit sous forme de **transfert thermique** (Q) :



Remarque. Le 1er principe de la thermodynamique sert à effectuer l'étude thermique ou le bilan thermique.

Le terme ΔE_{totale} correspond à la variation de l'énergie du système, W et Q correspondant à des transferts d'énergie entre le système et l'extérieur.

Remarque. Quand les transferts d'énergie conduisent à une augmentation d'énergie du système on a $\Delta U > 0$ (FIG. 4).



FIG. 4 W_e correspond à l'énergie reçue du réseau électrique par une bouilloire et Q l'énergie fournie à l'eau par celle-ci. Pour la bouilloire : $W_e > 0$ et $Q < 0$.

2 Transferts et flux thermiques

Capacité thermique

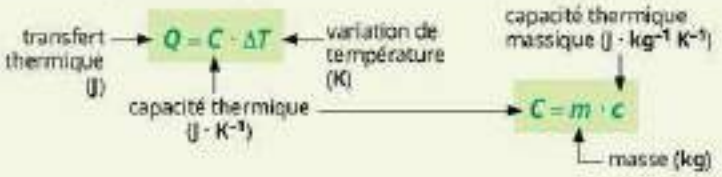
Un système peut stocker de l'énergie sous forme d'énergie interne et restituer ensuite cette énergie. La capacité thermique traduit cette possibilité.

La **capacité thermique** C d'un système est une grandeur qui traduit l'énergie qu'il faut transférer à celui-ci pour augmenter sa température de 1 kelvin.

Remarque. Comme il s'agit d'une variation de température, on peut raisonner directement sur des températures en degré Celsius.
$T(K) = \theta(°C) + 273$

Transfert thermique

Un **transfert thermique** Q est un transfert d'énergie entre le système et l'extérieur qui se traduit par une variation de température ΔT du système :



Pour système fermé au repos et incompressible, on a : $\Delta U = Q = C \cdot \Delta T$

Modes de transferts thermiques

Il existe trois modes de transferts thermiques (qui peuvent coexister), selon la façon dont l'énergie est transférée.

La **conduction** est un transfert thermique par contact entre le système et l'extérieur.

EXEMPLE

Une casserole en contact avec une plaque électrique s'échauffe (FIG. 5). Au niveau microscopique, l'agitation thermique se transmet de proche en proche sans transport de matière.

La **convection** est un transfert thermique entre le système et l'extérieur par mouvement de matière au sein du système.

EXEMPLE

L'air d'une pièce peut se réchauffer à l'aide d'un radiateur placé au bord de la pièce par circulation des particules de l'air (FIG. 6). L'air chaud moins dense s'élève et l'air froid plus dense descend, le tout crée un mouvement de convection.

Le **rayonnement** est un transfert thermique qui se fait par le biais d'une onde électromagnétique.

EXEMPLE

Le Soleil réchauffe la Terre à distance (FIG. 7).

Sens de transfert thermique

Un transfert thermique ne peut se faire que **dans un seul sens**.

Le **sens du transfert thermique** ne peut se faire que d'un milieu qui a la température la plus élevée (la source chaude), vers un milieu qui a la température la plus faible (la source froide) (FIG. 8), jusqu'à ce que leurs températures soient égales.

EXEMPLE

Un café chaud laissé dans sa tasse va transférer son énergie au milieu environnant et donc se refroidir de façon irréversible.

Flux thermique

Un transfert thermique peut se faire plus ou moins rapidement. Pour évaluer cette **vitesse de transfert**, on détermine le flux thermique.

Le **flux thermique** Φ correspond au transfert thermique Q qui s'écoule entre deux milieux par unité de temps :

flux thermique (W) $\Phi = \dfrac{Q}{\Delta t}$ ← transfert thermique (J) ; ← durée (s)

Le flux thermique a les dimensions d'une puissance : on parle d'ailleurs de puissance thermique.

Remarque. Une habitation est bien isolée si les matériaux qui la constituent assurent un faible flux thermique, permettant ainsi de ralentir les transferts thermiques avec l'extérieur.

Résistance thermique

Quand on coupe le chauffage d'une habitation en hivers, sa température va baisser d'autant plus rapidement que la différence de température entre



FIG. 5 Le fond de la casserole s'échauffe au contact de la plaque électrique.



FIG. 6 Le principe d'un convecteur électrique repose sur le mouvement de convection de l'air.



FIG. 7 Le rayonnement du Soleil réchauffe l'atmosphère de la Terre.

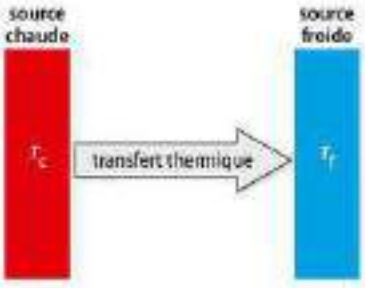


FIG. 8 Le transfert thermique se fait toujours de la source chaude vers la source froide.

l'intérieur et l'extérieur est important. Cette baisse sera ralentie si les murs sont bien isolés (FIG. 9).

La **résistance thermique** R traduit l'opposition plus ou moins forte du système ou du matériau au flux thermique Φ. Plus elle est élevée, plus le flux thermique sera faible.
Le **flux thermique** ϕ est lié à la différence de température ΔT entre les deux milieux pour lesquels le transfert thermique se fait et à la résistance thermique R par la relation :

température de la « source chaude » (J) ; température de la « source froide » (J)

$$\Phi = \frac{T_C - T_F}{R_{th}}$$

flux thermique (W) ; résidence thermique ($K \cdot W^{-1}$)

EXEMPLE

Pour maintenir dans un sauna une température de 70 °C à l'intérieur alors que la température extérieure est de 20 °C, il faut fournir une puissance de 1 500 W. On peut donc déterminer la valeur de la résistance thermique de la cloison dans ce cas : $R_{th} = \frac{\Delta T}{\Phi} = \frac{50}{1500} = 3{,}3 \times 10^{-2}\ K \cdot W^{-1}$

Il existe une relation entre la résistance thermique d'un matériau et ses caractéristiques :

résistance thermique ($K \cdot m^{-1}$)

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda \cdot S}$$

épaisseur de la paroi (m) ; surface de la paroi (m^2) ; conductivité thermique de la paroi ($W \cdot m^2 \cdot K^{-1}$)



FIG. 9 On obtient une bonne valeur de résistance thermique quand on isole une habitation.

3 Deux lois thermiques

Loi de Stefan-Boltzmann

Tout corps de température non nulle perd de l'énergie par rayonnement. La loi de Stefan-Boltzmann définit la relation qui existe entre le flux thermique par unité de surface d'un objet et la température de l'objet considéré comme un « corps noir », objet idéal qui émet sous forme d'un rayonnement toute l'énergie qu'il reçoit.

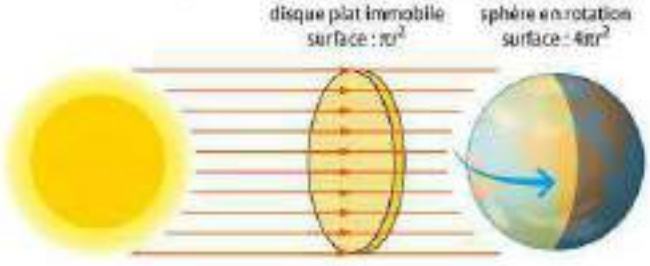
Loi de Stefan-Boltzmann

$$F = \sigma \cdot T^4$$

flux thermique par unité de surface ($W \cdot m^2$) ; température du « corps noir » (K)

$\sigma = 5{,}67 \times 10^{-2}\ (W \cdot m^2 \cdot K^{-4})$

Le flux thermique reçu au sommet de l'atmosphère terrestre par le Soleil par unité de surface perpendiculaire aux rayons solaires (ou constante solaire) est connu. Il vaut en moyenne $F = 1\,368\ W \cdot m^{-2}$ (FIG. 10).



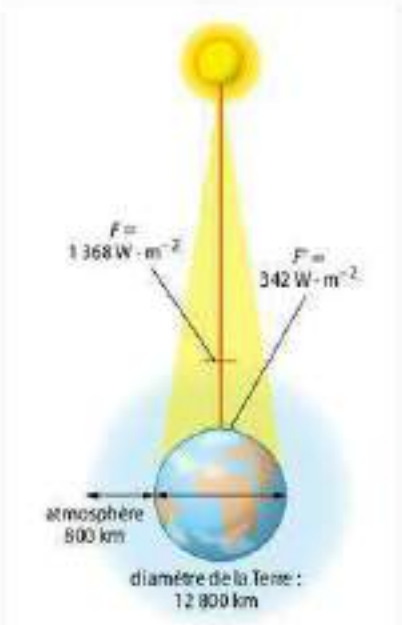


FIG. 10 Flux thermique reçu du Soleil par unité de surface.

Le flux thermique se répartit sur la totalité de la surface de la Terre :

$$\Phi = F_{\text{Surface disque}} = F'_{\text{Surface de la Terre}}$$

$F \cdot \pi \cdot R_{atm}^2 = F' \cdot 4 \cdot \pi \cdot R_{atm}^2$ donc $F' = F/4 = 342\ W \cdot m^{-2}$

On peut estimer que la température terrestre moyenne est globalement stable et donc dire que le flux thermique reçu du Soleil est égale au flux thermique émis par la Terre : $\Phi_{\text{reçu du Soleil}} = \Phi_{\text{émis par la Terre}}$

Donc : $\sigma \cdot T^4 = F'$; soit : $T = 279$ K ce qui correspond à 6 °C.

Or la **température moyenne terrestre est de 15 °C**. Cette valeur diffère de sa valeur théorique car la Terre n'est pas un « corps noir » : la Terre réfléchit vers l'espace 30 % de l'énergie qu'elle reçoit (FIG. 10), phénomène caractérisé par l'albédo.



FIG. 10 Environ 70 % du flux thermique reçue est absorbée.

L'**albédo** correspond à la proportion de l'énergie reçue par la Terre qui est réfléchie et n'est donc pas absorbée. La **terre et son atmosphère présentent un albédo A = 0,30.**

Les gaz de l'atmosphère absorbent environ 20 % du rayonnement émis par le sol (FIG. 11) conduisant à l'effet de serre.

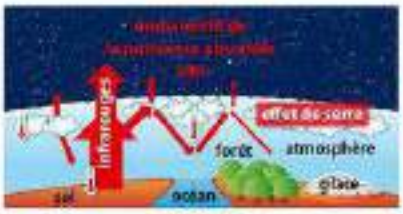


FIG. 11 Le flux thermique absorbée alimente l'effet de serre.

L'**effet de serre** est un phénomène naturel de réchauffement d'une planète, provoqué par des gaz de son atmosphère qui absorbent une partie du rayonnement infrarouge émis par le sol.

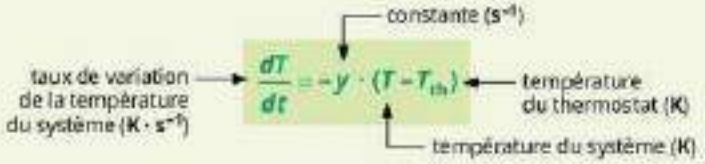
Loi thermique de Newton

Un **thermostat** est un objet dont la température reste constante.

Le milieu extérieur peut souvent jouer le rôle de thermostat pour un système étudié.

Newton avait remarqué qu'un objet se refroidissait d'autant plus rapidement que la température entre ce corps et l'extérieur était importante.

La **loi de Newton** indique que le taux de variation de température d'un système, incompressible échangeant de l'énergie par un transfert thermique, est proportionnel à la différence entre les température du corps T et celle extérieure qui joue le rôle de thermostat T_{th} :



La loi de Newton est une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants avec second membre constant du type :

$$y' = a \cdot y + b$$

La résolution de ce type d'équation différentielle est la suivante :

$$y(x) = A \cdot e^{a \cdot x} + B$$

On en déduit que :

$$T(t) = A \cdot e^{-\gamma \cdot t} + B$$

Quand t tend vers l'infini, $T = T_{th}$ donc $B = T_{th}$

A $t = 0$ s, $T = T_0$ donc $T_0 = A + T_{th}$ donc $A = T_0 - T_{th}$

Donc :

$$T(t) = (T_0 - T_{th}) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + T_{th}$$

L'évolution de la température se traduit par une fonction exponentielle décroissante qui tend vers la température du thermostat T_{th} (FIG. 12).

UN PONT VERS LES MATHS

Une équation différentielle de la forme $u' + ku = K$ (ou $du/dt + ku = K$) admet pour solution la fonction

$$u(t) = u_0 e^{-kt} + u_{lim}$$

La constante u_0 est déterminée grâce aux conditions initiales ($u(0) = u_0$).

La constante u_{lim} est la valeur de $u(t)$ quand t tend vers l'infini.

→ Fiche MATHS p. 533

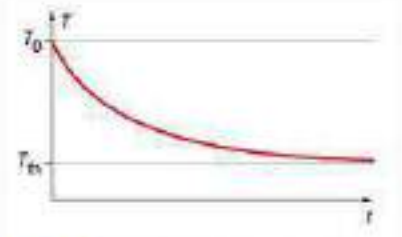


FIG. 12 Évolution de la température en fonction du temps d'un système au contact d'un thermostat.

1 Premier principe de la thermodynamique

Énergie interne d'un système

$U = E_{c\,micro} + E_{pp\,micro}$

- U : énergie interne (J)
- $E_{c\,micro}$: énergies cinétiques microscopiques (J)
- $E_{pp\,micro}$: énergies potentielles microscopiques (J)

Énergie totale d'un système

$E_{tot} = E_c + E_{pp} + U$

- E_{tot} : énergie totale (J)
- E_c : énergie cinétique (J)
- E_{pp} : énergie potentielle de pesanteur (J)
- U : énergie interne (J)

Système au repos : $\Delta E_{tot} = \Delta U$

Premier principe de la thermodynamique

$\Delta U = W + Q$

- ΔU : variation énergie interne du système (J)
- W : travail (J)
- Q : transfert thermique (J)

Dans le cas d'un système incompressible :

$\Delta U = Q$

2 Transferts et flux thermiques

Transfert thermique

$Q = C \cdot \Delta T$

- Q : transfert thermique (J)
- ΔT : variation de température du système (K)

$C = m \cdot c$

- C : capacité thermique du système (J · K⁻¹)
- m : masse (kg)
- c : capacité thermique massique (J · kg⁻¹ K⁻¹)

Flux thermique

$\Phi = \frac{Q}{\Delta t}$

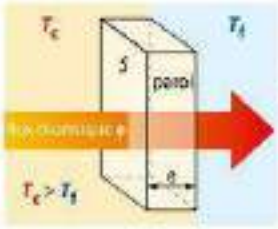
- Φ : flux thermique (W)
- Q : transfert thermique (J)
- Δt : durée du transfert (s)

$\Phi = \frac{T_C - T_f}{R_{th}}$

- Φ : flux thermique (W)
- T_C : température de la « source chaude » (J)
- T_f : température de la « source froide » (J)
- R_{th} : résistance thermique du système (K · W⁻¹)

Modes de transfert thermique





$R_{th} = \frac{e}{\lambda \cdot S}$

- R_{th} : résistance thermique (K · m⁻¹)
- e : épaisseur de la paroi (m)
- λ : conductivité thermique de la paroi (W · m² · K⁻¹)
- S : surface de la paroi (m²)

3 Deux lois thermiques

Loi de Stefan-Boltzmann

$F = \sigma \cdot T^4$

- F : flux thermique par unité de surface (W · m²)
- T : température du « corps noir » (K)
- $\sigma = 5{,}67 \times 10^{-2}$ (W · m² · K⁻⁴)

Loi thermique de Newton

$\frac{dT}{dt} = -\gamma \cdot (T - T_{th})$

- $\frac{dT}{dt}$: taux de variation de la température du système (K · s⁻¹)
- γ : constante (s⁻¹)
- T_{th} : température du thermostat (K)
- T : température du système (K)

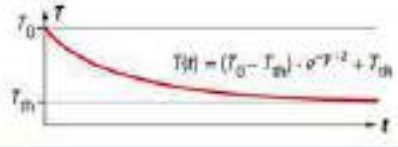
Température moyenne terrestre théorique

$F_{\text{reçu du Soleil}} = 342\ W \cdot m^{-2}$

$T_{\text{terrestre moyenne théorique}} = 6\ °C$

albédo terrestre de 0,3
effet de serre

$T_{\text{terrestre moyenne théorique}} = 15\ °C$



Vérifier l'essentiel

EN AUTONOMIE

Pour chaque question, choisir la ou les bonnes réponses. ➡ SOLUTIONS EN PAGE 593

Flash PAGE corrigés détaillés

Flash PAGE QCM interactifs

DONNÉES

- Loi de Stefan-Boltzmann $F = \sigma \cdot T^4$
- Loi thermique de Newton $\frac{dT}{dt} = -\gamma \cdot (T - T_{th})$

1 Premier principe de la thermodynamique

	A	B	C
1 L'énergie interne U d'un système :	est l'énergie propre d'un système.	est égale à $E_c + E_{pp}$	est liée à la température du système.
2 La variation d'énergie interne :	s'écrit ΔU.	s'exprime en watt.	s'exprime en joule.
3 Si un système est au repos :	$E_{totale} = E_c + E_{pp} + U$.	$\Delta E_{totale} = \Delta U$.	$\Delta E_{totale} = 0$ J.
4 Pour un système fermé au repos et incompressible :	$\Delta E_{totale} = \Delta U = W$	$\Delta E_{totale} = \Delta U = Q$	$\Delta E_{totale} = \Delta U = W + Q$

2 Transferts et flux thermiques

	A	B	C
5 Un transfert thermique :	s'écrit Q.	est égale à $C \cdot \Delta T$.	est égale à $C \cdot \Delta t$.
6 S'il y a mouvement de matière on parle de :	conduction.	convection.	flux thermique.
7 Le transfert thermique est orienté :	uniquement dans un sens.	de la source froide à la source chaude.	s'il y a un écart de température.
8 Le flux thermique Φ :	est égale à $\Delta t/Q$.	est égale à $Q \cdot \Delta t$.	est égale à $Q/\Delta t$.
9 La résistance thermique :	est égale à $\Delta T/\Phi$.	est égale à $a \cdot \Delta T$.	est égale à $a/\Delta T$.

3 Deux lois thermiques

	A	B	C
10 La loi de Stefan-Boltzmann :	n'est valable que pour un corps noir.	s'écrit $F = \sigma \cdot T^2$.	s'écrit $F = \sigma \cdot T^4$.
11 La température moyenne terrestre est influencée :	par l'albédo de la Terre et son atmosphère.	par l'effet de serre.	par le flux thermique reçu du Soleil.
12 La loi de refroidissement de Newton :	est une équation différentielle.	montre que dT/dt est lié à $(T - T_{th})$.	traduit le fait que T tend vers T_{th}.
13 La température d'un système en contact avec un thermostat :	tend vers la température du thermostat.	a pour expression $T(t) = T_{th} \cdot e^{-\gamma t}$	varie d'autant plus rapidement que sa valeur est écartée de celle du thermostat.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Acquérir les bases

1 Premier principe de la thermodynamique

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Énergie interne
- Définir l'énergie interne d'un système et en citer les différentes contributions microscopiques

➥ Acquérir les bases : 14 ➥ S'entraîner : 35

Premier principe de la thermodynamique
- Effectuer l'étude énergétique d'un système thermodynamique
- Écrire le premier principe de la thermodynamique pour un système au repos
- Distinguer le terme correspondant à la variation de l'énergie du système des termes correspondant à des transferts d'énergie entre le système et l'extérieur

➥ Acquérir les bases : 17 ➥ S'entraîner : 36

14 Tempête dans un verre d'eau

L'eau contenue dans un verre posé sur une table est parfaitement stable.

Cette eau peut-elle être le siège d'une variation d'énergie sans que sa position ou sa vitesse soient modifiées ? Argumenter la réponse.

15 Contributions microscopiques

1. a. Qu'appelle-t-on l'énergie interne d'un système ?
b. Citer les différentes contributions microscopiques de l'énergie interne d'un système.

2. a. Comment expliquer l'existence d'énergies cinétiques microscopiques ?
b. À quelle grandeur macroscopique associe-t-on ces énergies cinétiques microscopiques ?

3. a. Comment expliquer l'existence d'énergies potentielles d'interaction microscopiques ?
b. Comment expliquer la faible contribution de ces énergies dans le cas d'un gaz comme l'air ?

16 Qui a le plus d'énergie ?

On considère deux systèmes constitués respectivement de 100 g de vapeur d'eau et de 100 g d'eau liquide, tous les deux à 100 °C.

1. Quelle contribution énergétique à l'énergie interne prédomine pour chaque système ?

2. Quel système a l'énergie interne la plus grande ?

17 Vrai ou Faux ?

Répondre par vrai ou par faux aux affirmations suivantes. Corriger celles qui sont fausses.

1. L'énergie totale d'un système est toujours la somme de son énergie cinétique macroscopique et de son énergie potentielle de pesanteur.

2. Pour obtenir une même variation d'énergie interne ΔU, il faut transférer la même énergie, que ce soit par travail W ou transfert thermique Q.

3. Au cours d'un freinage, de l'énergie est détruite car l'énergie cinétique diminue.

18 Chocolat fouetté



Dans un récipient, 500 g de chocolat chaud encore liquide refroidissent et sont brassés à l'aide d'un fouet électrique.

1. Effectuer l'étude énergétique du système (chocolat) en s'appuyant sur un diagramme énergétique.

2. a. Écrire le premier principe de la thermodynamique en justifiant que le système est au repos.
b. Distinguer le terme correspondant à la variation de l'énergie du système des termes correspondant à des transferts d'énergie entre le système et l'extérieur.
c. Sachant que l'énergie perdue par le chocolat en se refroidissant est de 50 kJ et que l'énergie reçu par le fouet est de 10 kJ, déterminer la variation d'énergie interne du système.

19 Pompe à chaleur

Une pompe à chaleur (PAC) est destinée à assurer le chauffage d'un local à partir d'une source de chaleur externe (l'air, le sol ou l'eau) dont la température est inférieure à celle du système à chauffer. Pour réaliser ce transfert thermique (non naturel), une dépense d'énergie est nécessaire : elle correspond au travail fourni par un compresseur à un fluide caloporteur (corps capable à la fois de s'écouler et d'échanger de l'énergie).

1. Recopier et compléter le schéma ci-dessous représentant le bilan énergétique de la pompe à chaleur.



2. Écrire le premier principe de la thermodynamique appliqué à la pompe à chaleur en justifiant que le système est au repos.

2 Transferts et flux thermiques

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Capacité thermique d'un système incompressible
- Connaître et exploiter l'expression $\Delta U = Q = C \cdot \Delta T$ pour un système incompressible

➥ Acquérir les bases : 23 ➥ S'entraîner : 36

Modes de transferts thermiques
- Connaître et savoir caractériser les trois modes de transfert thermique : conduction, convection, rayonnement

➥ Acquérir les bases : 22 ➥ S'entraîner : 35

Flux thermique. Résistance thermique
- Prévoir le sens d'un transfert thermique
- Savoir que le flux thermique est lié au transfert thermique ($\Phi = Q/\Delta t$)
- Connaître et exploiter l'expression $\Phi = \Delta t / R$
- Exprimer R si relation donnée

➥ Acquérir les bases 24 ➥ S'entraîner : 31 32 38

20 Pertes thermiques d'une habitation

Pour évaluer les pertes thermiques d'une habitation, on procède à l'expérience suivante : la masse m d'air à l'intérieur de la maison étant initialement à la température $T_1 = 19{,}0$ °C, on coupe le système de chauffage pendant une durée $\Delta t = 1{,}00$ h. On mesure une température finale $T_2 = 15{,}6$ °C.

Données : *capacité thermique massique de l'air :* $c_p = 1\,000\ J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$; *volume intérieur de la maison :* $V = 400\ m^3$; *masse volumique de l'air :* $\rho = 1{,}3\ kg \cdot m^{-3}$.

1. Exprimer, puis calculer, la variation de l'énergie interne ΔU de l'air contenu dans la maison.

2. Interpréter le signe du résultat obtenu à la question précédente.

21 Mug de thé au micro-ondes

On réchauffe l'eau de son thé à l'aide d'un four à micro-ondes. Le volume d'eau dans le mug est de $V = 250$ mL. Lorsque les micro-ondes atteignent les molécules d'eau, celles-ci se mettent à osciller. La mise en mouvement des molécules d'eau produit la chaleur nécessaire pour réchauffer les aliments. Le four est réglé sur la position de puissance $P = 900$ W. La température de l'eau passe ainsi de 10 °C à 90 °C. On suppose que le four à micro-ondes est bien isolé.

Données : *masse volumique de l'eau :* $\rho_{eau} = 1{,}00\ kg \cdot L^{-1}$; *capacité thermique de l'eau :* $c_{eau} = 4\,180\ J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$; *l'énergie transférée à un système avec une puissance P pendant la durée* Δt *est :* $E = P \cdot \Delta t$.

1. Calculer la variation d'énergie interne de l'eau contenue dans le mug.

2. Au bout de combien de temps l'eau du thé sera-t-elle prête ?

22 Douche solaire



Une douche solaire, généralement constituée d'un sac plastique noire, est exposée au soleil pour pouvoir être utilisée.

Identifier et caractériser chacun des types de transferts thermiques principaux mis en jeu pour obtenir de l'eau chaude.

23 Café chaud dans un thermos

Dans une bouteille thermos, on verse 1,0 L de café à la température de 60 °C. La température de l'ensemble se stabilise à 52 °C. La capacité thermique et la masse volumique du café seront prises égales à celle de l'eau.

Données : *capacité thermique massique de l'eau :* $c_{eau} = 4{,}18\ kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$; *masse volumique de l'eau :* $\rho_{eau} = 1{,}0\ kg \cdot L^{-1}$

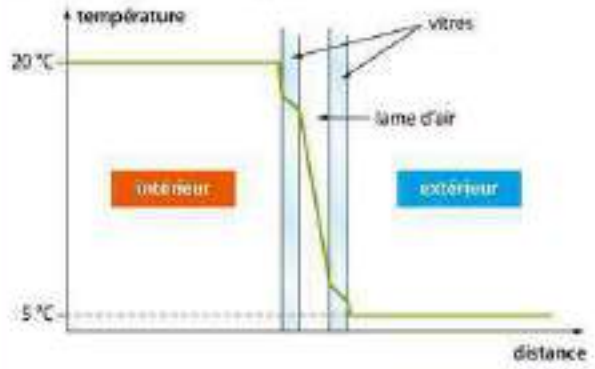
1. Calculer la valeur de la variation d'énergie interne du café.

2. En supposant que la bouteille thermos est parfaitement isolée, déterminer la variation d'énergie interne du système (thermos + café).

3. En déduire la valeur de la variation d'énergie interne de la bouteille thermos.

24 Double vitrage

On a représenté ci-contre l'évaluation de la température à la traversé d'un double vitrage, pour un flux constant :



1. Dans quel sens se fait le transfert thermique ?

2. Comparer qualitativement les résistances thermiques du verre et de l'air.

3. De l'air ou du verre, quel est le meilleur isolant thermique ?

25 Bon choix d'isolant thermique

Afin de réduire les dépenses de chauffage et d'avoir un comportement écoresponsable, on cherche à améliorer l'isolation thermique d'une habitation. En effet celle-ci ne possède un grenier non chauffé, on décide donc d'en isoler le sol.

Il existe de nombreux matériaux isolants caractérisés par leur conductivité thermique notée λ. Plus la conductivité thermique d'un matériau est élevée, plus il conduit facilement la chaleur.

Données :
- *température du grenier :* $\theta_1 = 5{,}0$ °C ;
- *température de la maison :* $\theta_2 = 20$ °C ;
- *surface du sol du grenier :* $S = 80\ m^2$;
- *résistance thermique du sol du grenier non isolé :* $R = 7{,}5 \times 10^{-3}\ K \cdot W^{-1}$;
- *expression de la résistance thermique :* $R = \dfrac{e}{\lambda \cdot S}$

avec e épaisseur (en m) et S surface (en m²) de la paroi.

Nom du matériau	Laine de roche	Polystyrène extrudé	Liège naturel expansé	Cellulose
Conductivité thermique λ en $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0,035	0,033	0,042	0,039

1. a. Dans quel sens s'effectue le transfert thermique dans l'habitation ?
b. Donner l'expression puis calculer le flux thermique Φ à travers le sol du grenier non isolé.

2. a. Quel serait un bon choix de matériau pour un isolant thermique ?
b. On veut diviser le flux thermique par 10. Sachant que lorsque plusieurs parois sont accolées, la résistance thermique totale est égale à la somme des résistances thermiques de chaque paroi, calculer la résistance thermique de l'isolant.
c. Tous les matériaux proposés s'achètent sous forme de panneaux rigides dans le commerce. Quelle épaisseur minimale doit posséder le panneau du matériau choisi ?

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

3 Deux lois thermiques

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Bilan thermique du système Terre-atmosphère

- Effectuer un bilan quantitatif d'énergie pour estimer la température terrestre moyenne, la loi de Stefan-Boltzmann étant donnée
- Discuter qualitativement de l'influence de l'albédo et de l'effet de serre sur la température terrestre moyenne

Acquérir les bases : 24 S'entraîner : 35

Loi thermique de Newton

- Effectuer un bilan d'énergie pour un système échangeant de l'énergie par un transfert thermique modélisé à l'aide de la loi de Newton fournie
- Établir l'expression de la température du système en fonction du temps et résoudre l'équation différentielle

Acquérir les bases : 28 S'entraîner : 33, 36

26 Température moyenne terrestre

1. Le flux thermique reçu du Soleil et répartit sur la totalité de la surface de la Terre vaut 342 W · m^{-2}.

La terre et son atmosphère présentent un albédo A = 0,30.

a. Quel est l'effet de l'albédo sur le flux thermique reçu du Soleil à la surface de la Terre ?

b. On considère la Terre comme un « corps noir », objet idéal qui émet sous forme d'un rayonnement toute l'énergie qu'il reçoit. On suppose que son flux thermique par unité de surface est proportionnel à sa température élevée à la puissance 4. Quel est l'effet de l'albédo sur la température moyenne terrestre ?

2. a. Les gaz de l'atmosphère absorbent environ 20 % du rayonnement émis par le sol. Comment appelle-t-on ce phénomène.

b. Quel est son effet sur la température moyenne terrestre ?

27 Loi de Stefan-Boltzmann

La loi de Stefan-Boltzmann définit la relation qui existe entre le flux thermique par unité de surface F (en W · m^{-2}) d'un objet et la température T(en K) de l'objet considéré comme un « corps noir », objet idéal qui émet sous forme d'un rayonnement toute l'énergie qu'il reçoit : $F = \sigma \cdot T_4$ avec $\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}$ SI.

Donnée : $T(K) = \theta(°C) + 273$

Le flux thermique reçu du Soleil et répartit sur la totalité de la surface de la Terre vaut 342 W · m^{-2}.

1. Établir le bilan d'énergie qui peut permettre d'estimer la température terrestre moyenne.

2. a. Retrouver l'unité de la constante de Boltzmann.

b. À l'aide de la loi de Stefan-Boltzmann et du bilan d'énergie établi, estimer la température terrestre moyenne.

3. La température terrestre moyenne est de 15 °C. Comment expliquer l'écart avec la valeur déterminée à l'aide de la loi de Stefan-Boltzmann.

28 Refroidissement d'une tasse de café

On considère une tasse de café initialement à la température de 75 °C dans une pièce à 25 °C.

Après 5 minutes le café est à 50 °C.

On suppose que la vitesse de refroidissement du café est proportionnelle à la différence des températures (autrement dit que la température du café suit la loi de Newton) : cela signifie qu'il existe une constante $\gamma < 0$ telle que la température vérifie l'équation différentielle de premier ordre :

$dT(t)/dt = \gamma(T(t) - T_{amb})$

1. Effectuer un bilan énergie pour le système (café).

2. Donner la valeur de T_{amb}.

3. Résoudre l'équation différentielle en donnant l'expression de $T(t)$ en fonction de γ.

4. a. Déterminer la valeur numérique de la constante de refroidissement γ.

b. En déduire l'expression générale de $T(t)$.

Faire le point avant d'aller plus loin

PRÉPA BAC

Pour vérifier ses connaissances, répondre aux questions suivantes (sans regarder le cours !)

Citer les énergies microscopiques qui contribuent à l'énergie interne d'un système

Écrire le premier principe de la thermodynamique en explicitant chaque grandeur et son unité.

Citer les modes de transferts thermique et définir chacun d'entre eux.

Effectuer un bilan d'énergie pour une bouilloire électrique.

Écrire la relation qui relie le flux thermique et le transfert thermique en explicitant chaque grandeur et son unité.

Expliciter les étapes qui permettant d'estimer la température moyenne terrestre à partir de la loi de Stefan-Boltzmann :

flux thermique par unité de surface (W · m^2) → $F = \sigma \cdot T^4$ ← température du « corps noir » (K)

$\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}$ (W · m^2 · K^{-4})

Écrire la relation qui lie le flux thermique et la variation de température d'un système en explicitant chaque grandeur et son unité.

En utilisant la loi de Newton pour de l'eau fraîche qui se réchauffe à température ambiante on a trouvé l'expression : $T(t) = A \cdot e^{\gamma t} + B$ Quelles données expérimentales permettent de déterminer A et B ?

Retrouver ces questions en version numérique Flash PAGE cartes mémos

Exercice résolu EN AUTONOMIE

29 Maison passive

On dit d'une maison qu'elle est passive lorsque ses besoins en chauffage sont inférieurs à 15 kWh par m² habitable et par an.

Dans la région où est prévue la construction d'une maison de surface habitable 68 m², la température extérieure moyenne du sol en hiver est d'environ 10 °C et celle de l'air extérieur, 4 °C. Un poêle à bois maintient la température intérieure de la maison constante à T_i = 19 °C. Pendant une journée, les valeurs des transferts thermiques sont alors : pour les murs extérieurs Q_m = 56 MJ, pour les vitres Q_V, pour le sol Q_S = 37 MJ et pour les combles Q_C = 24 MJ.

Données : *tableau des caractéristiques des vitres utilisées (ci-contre)*
1 kWh = 3,6 × 10⁶ J ;
la résistance thermique R_{th} d'une paroi plane a pour expression : $R = \frac{e}{\lambda \cdot S}$ où e est l'épaisseur du matériau (m), λ la conductivité thermique caractérisant le matériau ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) et S la surface de la paroi (m^2).

	Surface (m^2)	Matériaux	Épaisseur (cm)	Conductivité thermique λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
Vitres	15	triple vitrage verre/air	3,6	0,023

1. **Déterminer** la résistance thermique R_V des vitres.

2. a. **Déterminer** Q_V.
b. **En déduire** la valeur du flux thermique fourni par un poêle à bois pendant une journée.

3. Dans ces conditions, si, par an, la période de chauffage dure 100 jours, peut-on considérer la maison comme passive ?

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- Les températures données renseignent sur le sens du flux thermique et permettent d'en calculer sa valeur.
- Toutes les données sont nécessaires pour déterminer la résistance thermique des vitres (expression de la résistance et valeurs numériques utiles).

LES VERBES D'ACTION

- **Déterminer :** mettre en œuvre une stratégie pour trouver un résultat.
- **En déduire :** utiliser le résultat précédent pour répondre.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. $R = \frac{e}{\lambda \cdot S}$ AN : $R_V = 3{,}6 \times 10^{-2} / (0{,}023 \times 15) = \mathbf{0{,}10\ K \cdot W^{-1}}$

2. a. On sait que $\Phi = Q/\Delta t$ et $\Phi = (T_c - T_i)/R_{th}$
On en déduit que $Q_V/\Delta t = (T_i - T_{ext})/R_{th}$ donc $Q_V = (T_i - T_{ext}) \cdot \Delta t / R_V$
AN : $Q_V = (19 - 4) \times 24 \times 3\,600 / 0{,}10 = \mathbf{1{,}3 \times 10^7\ J = 13\ MJ}$
b. Comme la température intérieure ne varie pas, on a pour la maison : $\Delta U = 0$
Donc l'énergie fournie par les poêle compense les pertes d'énergie.
Donc on peut écrire : $Q_p = Q_m + Q_V + Q_S + Q_C$
AN : $Q_p = 56 + 13 + 37 + 24 = \mathbf{130\ MJ}$.

3. Besoin en chauffage par m² habitable et par an :
$(130/3{,}6) \times 100/68 = \mathbf{53\ kWh \cdot m^{-2} \cdot an^{-1}} > \mathbf{15\ kWh \cdot m^{-2} \cdot an^{-1}}$ donc la maison ne peut pas être considérée comme passive.

QUELQUES CONSEILS

2. et 3. Se baser sur l'expression de la résistance thermique donnée.

3. Il faut convertir l'épaisseur e en m. Les unités données pour S, e et λ aident à déterminer celle de R. Les données sont exprimées avec 2 chiffres significatifs donc le résultat aussi.

4. a. D'après l'énoncé, Δt correspond à une journée.
b. 1 MJ = 10⁶ J

5. La période de chauffe ne dure pas toute l'année.

EXERCICE SIMILAIRE

30 Dans un sauna

Un sauna, installé dans un centre nautique, est constitué d'une pièce équipée de cloisons en bois doublées d'un bon isolant thermique. Il reçoit de l'énergie thermique grâce à une résistance électrique se trouvant à l'intérieur de la pièce.

Des pierres de laves de faible résistance thermique sont positionnées sur une grille au-dessus de la résistance.

Les personnes se trouvant dans le sauna peuvent, s'il le désirent, arroser ces pierres avec de l'eau qui s'évapore à leur contact.

La température extérieure au sauna est de 18 °C. Pour maintenir une température de 80 °C à l'intérieur du sauna, la résistance reçoit une puissance P = 7,5 kW pendant 1,0 minute, toutes les 5 minutes.

Donnée : *La puissance (en W) correspond à une variation d'énergie (en J) par unité de temps (en s) : $P = \Delta E/\Delta t$*

1. Quelle énergie thermique reçoit le sauna pendant la minute de chauffe ?

2. Que vaut la résistance thermique du sauna ?



Exercice résolu EN AUTONOMIE

31 Muffins sortis du four



Des muffins sont sortis du four à 12 h 00 quand ils sont brûlants (100 °C). Après 10 minutes, leur température est de 80 °C.

On suppose que la vitesse de refroidissement $dT(t)/dt$ des muffins est proportionnelle à la différence $(T(t) - T_{cuis})$ de la température des gâteaux au cours du temps et la température de la cuisine (autrement dit que la température des muffins suit la loi de Newton).

La cuisine est une pièce où il y fait 20 °C.

1. a. **Établir** l'équation différentielle du premier ordre vérifié par $T(t)$ en prenant $-\gamma$ comme constante de proportionnalité ($\gamma > 0$).

b. **Résoudre** l'équation différentielle en donnant l'expression de $T(t)$ en fonction γ et de T_{cuis}.

2. **Déterminer** la constante γ.

3. Combien de temps faudra-il attendre pour que la température des muffins soit divisée par 2 par rapport à celle à la sortie du four.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- On donne la température du système à l'instant initial et à un autre instant.
- La loi thermique de Newton est donnée dans l'énoncé, il convient juste de la retranscrire mathématiquement.

LES VERBES D'ACTION

- **Établir** : élaborer.
- **Résoudre** : trouver la solution.
- **Déterminer** : mettre en œuvre une stratégie pour trouver un résultat.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. a. La vitesse de refroidissement $dT(t)/dt$ des muffins est proportionnelle à la différence $(T(t) - T_{cuis})$. En prenant $-\gamma$ comme constante de proportionnalité, on peut écrire : $dT(t)/dt = -\gamma \cdot (T(t) - T_{cuis})$.

b. La solution générale de l'équation différentielle s'écrit :

$T(t) = (T(0) - T_{cuis}) \cdot e^{-\gamma t} + C_{ste}$

À $t = 0$, $T(t) = T(0) = 100$ °C

Quand $t \to \infty$ $T(t) = \text{cste} = T_{cuis}$

Donc $T(t) = (100 - T_{cuis}) \cdot e^{-\gamma t} + T_{cuis}$

2. À $t = 10$ min, $T(t) = 80 = (100 - T_{cuis}) \cdot e^{-\gamma 10} + T_{cuis} = 80 \cdot e^{-\gamma 10} + 20$

Donc $e^{-\gamma 10} = 60 / 80$ donc $-10 \cdot \gamma = \ln(60/80)$

donc $\gamma = \ln(4/3)/10$.

3. On cherche t qui vérifie : $T(0)/2 = 50 = 80 \cdot e^{-\gamma t} + 20$ avec $\gamma = 0{,}1 \times \ln(4/3)$.

Ce suit revient à écrire : $e^{-\gamma t} = 3/8$

Donc $-\gamma t = \ln(3/8)$ donc $t = \ln(8/3) / (0{,}1 \times \ln(4/3)) = 34$ min.

Donc 34 minutes après leur sortie du four, la température des muffins sera divisée par 2.

QUELQUES CONSEILS

2. Dans ce cas $T_{ext} = T_{cuis}$

2. et 3. $\ln(e^a) = a$

$\ln(a/b) = -\ln(b/a)$

EXERCICE SIMILAIRE

32 Crime dans une série TV



Dans une série TV policière, le corps d'une victime est trouvé sur lieu du crime à 2 h 20 une nuit d'hivers, dehors, où la température extérieure est de - 5 °C. A l'heure de cette découverte macabre, la police scientifique relève que la température du corps est de 20 °C. Une demi-heure plus tard, quand il est retiré, sa température n'est plus que de 15 °C.

En utilisant la loi de Newton, le médecin légiste va réussir à déterminer l'heure du crime.

Données : *T (corps humain) = 37 °C ; loi thermique de Newton :* $dT(t)/dt = -\gamma(T(t) - T_{amb})$.

1. Donner la valeur de T_{amb}.

2. Résoudre l'équation différentielle en donnant l'expression de $T(t)$ en fonction de γ.

3. a. Déterminer la valeur numérique de la constante γ.

b. En déduire l'expression générale de $T(t)$.

4. Déterminer l'heure du crime.

S'entraîner pour maîtriser

SAVOIR RÉDIGER

33 Proposer une correction de la solution proposée par un élève à l'énoncé.

Énoncé

1. L'intérieur d'un réfrigérateur est refroidi à l'aide d'un tube en métal dans lequel circule un fluide froid.
a. Quelles sont les transferts thermiques mis en jeu ?
b. Où est-il le plus judicieux de placer le tube métallique ?

2. La température à l'intérieur du réfrigérateur est de 4 °C alors que la température extérieure est de 20 °C. La résistance thermique est de 0,89 K · W^{-1}.
a. Dans quel sens a lieu le transfert thermique ?
b. Déterminer le flux thermique échangé entre le réfrigérateur et l'extérieur.
c. En déduire l'énergie dissipée en kWh sur une année.

Solution proposée par un élève

1. a. Il y a de la conduction entre le tube en métal et l'air présent dans le réfrigérateur.
b. On place le tube métallique au milieu du réfrigérateur pour répartir le froid.

Il y a aussi un autre transfert qui a aussi une conséquence sur la place du tube. Cours à revoir

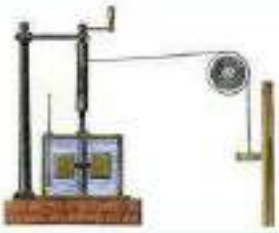
2. a. Le réfrigérateur va perdre du froid donc le transfert thermique va du réfrigérateur vers l'extérieur.
b. $\Phi = \Delta T / R = 16 / 0,89 = 17,98$ J
c. 1 an = 365,25 × 24 = 8 766 h
$\Delta U = Q = \Phi / \Delta t = 2 \times 10^{-3}$ Wh

Attention à l'unité et aux chiffres significatifs. Relation à revoir

34 Expérience de Joule

HISTOIRE DES SCIENCES

James Prescott Joule (1818-1889), médecin de formation, est un physicien anglais né à Salford, au nord de l'Angleterre. À son époque, selon la théorie du « calorique », transfert thermique et travail sont deux grandeurs sans lien immédiat entre elles, qui s'expriment donc avec des unités distinctes : la calorie et le joule. Pendant de nombreuses années, Joule se consacra à la mesure des variations de températures provoquées par de multiples procédés mécaniques.



Lors de ses essais avec l'eau, il utilisait un récipient calorifugé (donc isolé thermiquement de l'extérieur). Quand on actionnait une tige munie de palettes verticales, l'eau était vigoureusement agitée. Joule notait avec soin la température avant et après agitation et constatait que celle-ci augmentait.

1. Lorsque l'eau est agitée, quel effet mesurable est constaté. Comment l'expliquer au niveau microscopique ?

2. Quand on actionne la tige, quelle énergie est transférée à l'eau ?

3. Quel type d'énergie a accumulé le système (eau + récipient) ?

4. Établir le bilan énergétique en s'appuyant sur un diagramme d'énergie.

5. En quoi cette expérience remettait-elle en cause la théorie du calorique ?

35 Bouilloire électrique

Une bouilloire électrique, de puissance électrique 1 500 W, porte 0,40 L d'eau initialement à la température de 18 °C à 85 °C en 1 min 20 s.

1. Établir un bilan énergétique, sous forme de schéma, pour la bouilloire.

2. Calculer le rendement énergétique de cette bouilloire.

Données :
- *capacité thermique massique de l'eau : $c = 4,18$ kJ · kg^{-1} · K^{-1}*
- *expression du rendement énergétique : $\eta = E_{utile}/E_{dépensée}$*
- *masse volumique de l'eau : $\rho = 1,0$ kg · L^{-1}*

Coups de pouce

- L'énergie utile est ici l'énergie thermique réellement transmise à l'eau pour augmenter sa température.
- L'énergie dépensée correspond à l'énergie électrique consommée.
- La variation de température peut être exprimée directement en °C.

36 Pompe à chaleur pour piscine

Le chauffage par pompe à chaleur (PAC) est une des solutions les plus performantes pour chauffer l'eau d'une piscine. La pompe à chaleur fonctionne grâce à l'existence simultanée d'une source de température variable au cours du temps et d'une source de température constante, en recevant de l'énergie électrique.

On étudie une piscine équipée d'une bâche qui rend négligeable les échanges thermiques entre l'eau et l'air extérieur. La température de l'eau, avant chauffage, est égale à la température extérieure de 10 °C. On souhaite une eau à 27 °C.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique



Données :
- *capacité thermique massique de l'eau : $c = 4,18\ kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$;*
- *masse d'eau contenue dans la piscine : $m_{eau} = 10,0$ tonnes ;*
- *énergie électrique consommée par la PAC pour atteindre la température souhaitée : $We = 2,4 \times 10^8\ J$;*
- *expression du rendement énergétique : $\eta = E_{utile}/E_{dépensée}$*

1. On étudie le comportement thermique de l'eau de la piscine.

a. Expliquer ce qui se passe au niveau microscopique au niveau de l'eau pendant le fonctionnement de la PAC.

b. Calculer la variation d'énergie interne de l'eau quand l'eau a atteint la température souhaitée.

c. En déduire la valeur du transfert thermique fourni à l'eau par la PAC en explicitant le raisonnement.

2. On étudie la PAC. La variation de l'énergie interne de la PAC est nulle.

a. Identifier la source chaude et la source froide lors du fonctionnement de la PAC.

b. Représenter un diagramme qui traduit le bilan énergétique de la PAC.

c. Déterminer le rendement énergétique de la PAC.

d. Quelle énergie électrique We' aurait dû fournir un mode chauffage électrique classique (résistances chauffantes) pour obtenir la même température de l'eau ?

e. La PAC est-elle un dispositif de chauffage performant ?

37 Panneau thermique

Simplement décrit, un panneau solaire thermique est une boîte noire mate isolée, coiffée d'une vitre. À l'intérieur se trouve un serpentin de même couleur à travers lequel circule un fluide caloporteur. Le rayonnement solaire absorbé par le panneau chauffe le liquide caloporteur.



Données :
- *Puissance solaire surfacique reçue au niveau du sol : $800\ W \cdot m^{-2}$*
- *constante de la loi de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$*
- *$T(K) = \theta(°C) + 273$*

En supposant que le fond du panneau rayonne en respectant la loi de Stefan-Boltzmann, calculer la température théorique T_{th} de celui-ci.

En réalité, le fluide caloporteur est à l'équilibre thermique à $\theta = 50$ °C. Expliquer cette différence.

38 Le bilan radiatif de Vénus



Vénus est la deuxième planète par ordre d'éloignement au Soleil. Elle est aussi grande que la Terre mais est entourée d'une atmosphère très épaisse.

Le flux thermique reçu au sommet de l'atmosphère vénusienne par le Soleil par unité de surface perpendiculaire aux rayons solaires (ou constante solaire) est connu. Il vaut en moyenne $f = 2800\ W \cdot m^{-2}$.

On dit que l'équilibre radiatif d'une planète est atteint quand l'énergie rayonnée est égale à l'énergie reçue.

Vénus et son atmosphère présentent un albédo A = 0,70.

Données :
- *loi de Stefan-Boltzmann $F = \sigma \cdot T^4$*
- *constante de la loi de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$*

1. Dans un premier temps, on ne tient pas compte de l'atmosphère de Vénus.

a. Faire un schéma simplifié du bilan énergétique d'une planète sans atmosphère dans le cas où l'équilibre radiatif est atteint.

b. Calculer la valeur du flux thermique par unité de surface vénusienne. La démonstration s'appuiera sur un schéma.

2. Dans un second temps, on tient compte de l'albédo de Vénus et de son atmosphère.

a. Définir ce qu'on appelle un albédo.

b. Comparer l'albédo de Vénus à celui de la Terre. Comment expliquer cette différence ?

c. Calculer la valeur du flux thermique par unité de surface réellement absorbé par Vénus.

d. Calculer la température moyenne à la surface de Vénus en considérant cette planète comme un corps noir.

e. La température moyenne à la surface de Vénus est d'environ 450 °C. Être critique sur la valeur calculée précédemment et justifier l'écart constaté.

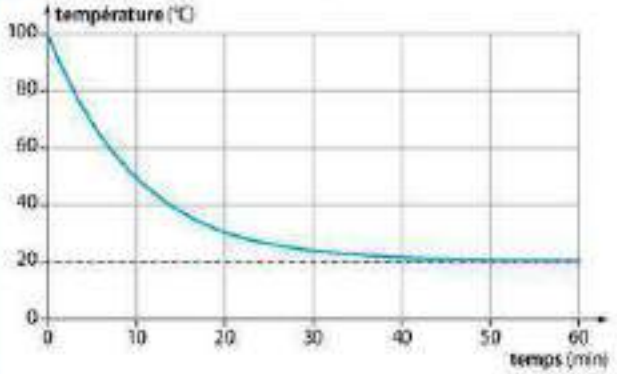
3. Comparer le bilan radiatif de la Terre et celui de Vénus et expliquer les différences.

39 Température d'une tasse de café

À l'aide d'une sonde de température, on relève l'évolution de la température d'une tasse de café dès lors qu'elle a été préparée. On obtient la courbe suivante :

1. a. Quelle est l'allure de la courbe obtenue ?

b. Quelle est la valeur de la température ambiante ?



c. Quelle est la valeur de la température initiale du café ? au bout de 10 min ? au bout de 30 min ?

2. On étudie cette phase de refroidissement modélisée par la loi de Newton : $d\mathcal{T}(t)/dt = -\gamma \cdot (\mathcal{T}(t) - \mathcal{T}_{th})$ avec γ constante.

a. Résoudre l'équation différentielle et donner l'expression de $\mathcal{T}(t)$ en fonction de γ.

b. Déterminer la valeur de γ.

c. En déduire la durée nécessaire pour que la température du café ait diminué de moitié ? Retrouve-t-on ce résultat par lecture graphique ?

Coups de pouce

- Pour déterminer γ, je prends un point de la courbe expérimentale.
- Le temps où la température du café a diminué de moitié est donnée par $\mathcal{T}(t) = 50$ °C.

40 Courbe de tendance TABLEUR-GRAPHEUR

À l'aide d'un dispositif d'acquisition relié à une sonde de température, on enregistre l'évolution de la température d'une eau chaude laissée à température ambiante.

On obtient le graphe suivant que l'on souhaite modéliser à l'aide d'une courbe de tendance :



1. a. Quel type de régression faut-il choisir ici ?

b. Est-il judicieux de forcer ici l'ordonnée à l'origine ? Si oui par quelle valeur ?

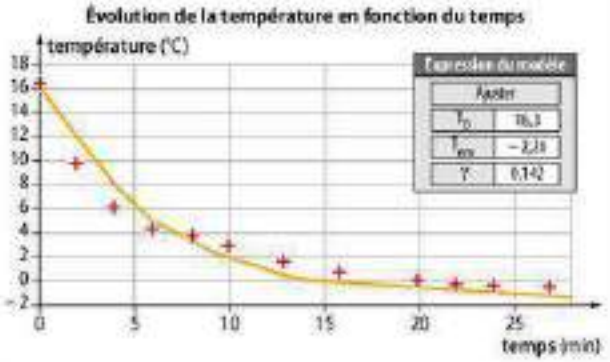
2. Quelle va être l'équation de la courbe de tendance affichée ?

41 Modélisation

À l'aide d'un dispositif d'acquisition relié à une sonde de température, on enregistre l'évolution de la température d'une eau plongée dans un mélange réfrigérant.

On obtient le graphe suivant que l'on modélise à l'aide d'une courbe de tendance.

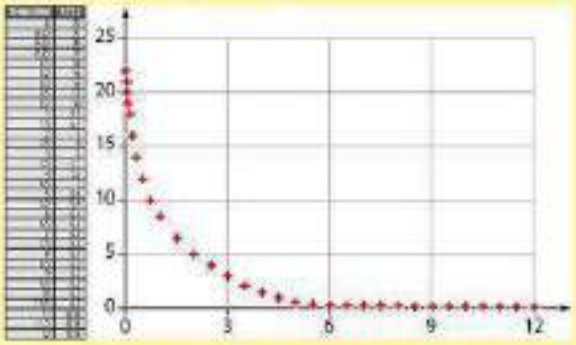
Comment expliquer l'écart entre le modèle retenu et la courbe expérimentale ?



À L'ORAL

42 Loi de refroidissement de Newton

On considère l'acquisition expérimentale suivante :



Élaborer un exposé oral de quelques minutes présentant :

- l'acquisition qui a été faite ;
- le protocole expérimental qui a pu être mis en œuvre pour l'obtenir ;
- le bilan énergétique qui traduit le phénomène observé ;
- l'explication microscopique du phénomène observé ;
- l'équation différentielle qui régit l'évolution observée ;
- la solution de l'équation différentielle en précisant la valeur de grandeurs.

Les mots-clés à utiliser

- **loi de refroidissement de Newton ;**
- **transfert thermique ;**
- **agitation thermique ;**
- **conduction ;**
- **température du thermostat ;**
- **système ;**
- **premier principe de la thermodynamique.**

43 RETOUR SUR LA PAGE D'OUVERTURE

On sait évaluer la température moyenne des planètes.



Préparer un exposé oral qui explique :

- comment déterminer théoriquement la température moyenne terrestre ;
- quels sont les paramètres à intégrer au modèle pour s'approcher de la valeur réelle qui est de 15 °C.

PRÉPA BAC

Développer ses compétences

44 La glacière du désert

RÉSOLUTION DE PROBLÈME

50 min

C.DM Présenter une démarche de manière argumentée, synthétique et cohérente

Le « bojito » est une cruche en terre cuite, jadis utilisée dans les régions méditerranéennes pour refroidir les liquides (eau et vin).



DOC 1 Le principe du « bojito »

Le « bojito » est composé d'un pot de terre cuite poreux imprégné d'eau. De la même manière que l'on ressent le froid quand on sort d'un bain, l'eau qui imprègne la terre cuite s'évapore et provoque un refroidissement. En pratique, on peut observer des chutes de températures de l'ordre de 5 °C à 20 °C !

DOC 2 Dispositif expérimental et résultat obtenus

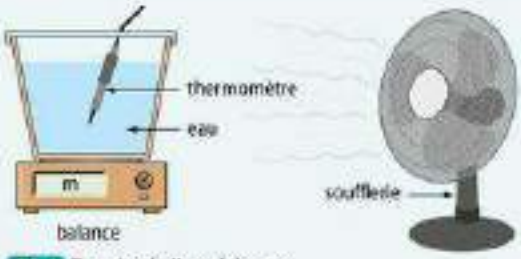


FIG. 1 Dessin de l'expérience.

Une expérience (FIG. 1) est réalisée au laboratoire afin de modéliser le comportement du système (cruche + eau). Le récipient contient un volume V d'eau liquide initialement à la température ambiante de 21 °C. La terre cuite de la cruche poreuse est imbibée d'eau liquide. L'expérience est réalisée dans des conditions stables d'humidité, dans un milieu de température ambiante constante à 21 °C et avec une soufflerie reproduisant un vent de vitesse constante 10 m · s^{-1}. Pendant six heures, on procède aux relevés simultanés des valeurs de la température de l'eau à l'intérieur de la cruche (FIG. 2) et de la masse totale de système (cruche + eau) (FIG. 3).



FIG. 2 Évolution de la température de l'eau au cours du temps.

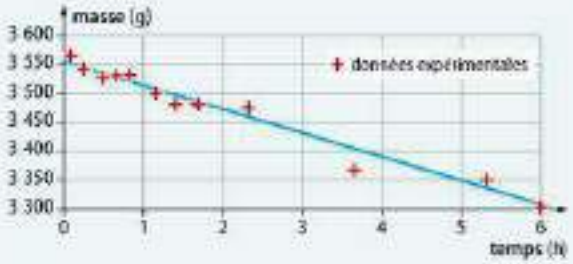
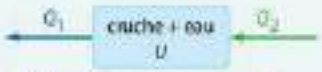


FIG. 3 Évolution de la masse du système (cruche + eau) au cours du temps.

DOC 3 Schéma des échanges d'énergie

Le bilan énergétique, pendant une durée Δt peut être représenté par le diagramme suivant :



Q_1 : énergie cédée à l'extérieur par vaporisation de l'eau :
$Q_1 = m \cdot Lv$ avec m la masse d'eau vaporisée pendant la durée Δt.
Q_2 : énergie reçue de l'extérieur par contact avec l'air.
U : énergie interne du système.

DONNÉES

- capacité thermique massique de l'eau : $c_{eau} = 4{,}18$ kJ · kg^{-1} · K^{-1}
- énergie massique de vaporisation de l'eau à 20 °C : $Lv = 2{,}4 \times 10^3$ kJ · kg^{-1}
- capacité thermique de la cruche : $C_{cruche} = 2{,}1$ kJ · kg^{-1}
- masse volumique de l'eau : $\rho_{eau} = 1{,}0$ kg · L^{-1}
- $V = 1{,}9$ L

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Calculer la variation d'énergie d'un volume $V = 1{,}9$ L d'eau dont la température diminue de 1 °C.
2. Déterminer la valeur de la masse d'eau du système (cruche + eau) qui se vaporise au cours du temps en gramme par heure.
3. Justifier l'existence des deux zones de la figure 3.

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

Pour prévoir la température du bojito au bout de la première heure, peut-on modéliser le fonctionnement en négligeant l'énergie reçue Q_2 de l'extérieur sur cette durée ?

Il est attendu une prise d'initiatives et une présentation de la démarche suivie même s'il elle n'a pas abouti.

45 Diagnostic de performance énergétique d'une habitation

RÉSOLUTION DE PROBLÈME — 50 min

ANALYSE Proposer une stratégie de résolution

Un acquéreur potentiel d'une habitation souhaite se renseigner sur son isolation thermique et connaître sa classe énergétique.

DOC 1 Le DPE

Obligatoire depuis l'année 2006 lors de la vente d'un logement et depuis 2007 lors de la location d'un logement, le diagnostic de performance énergétique, le DPE, renseigne sur la performance énergétique d'un logement ou d'un bâtiment, en évaluant sa consommation d'énergie totale annuelle (chauffage, eau chaude, électroménager).

La lecture du DPE est facilitée par une étiquette « énergie » (FIG. 1) comportant 7 classes de A à G (A correspondant à la meilleure performance, G à la plus mauvaise).



FIG. 1 Les 7 classes des consommations énergétiques en kWh/an et par m² de surface habitable.

DOC 2 Caractéristiques thermiques de l'habitation

	Surface (m^2)	Matériau	Épaisseur e (mm)	Conductivité thermique λ ($W \cdot m \cdot K^{-1}$)	Résistance thermique R_{th} ($K \cdot W^{-1}$)
Toitures	115	Laine de chanvre	100	0,042	R_{th} (toit)
		Terre cuite (tuile)	40	0,60	
Murs	91	Plâtre	13	0,46	0,020
		Polystyrène	50	0,036	
		Brique pleine	210	0,50	

DOC 3 Caractéristique général de l'habitation

L'habitation est une maison sans étage de surface habitable de 100 m^2. Elle est construite dans une région où la température de l'air extérieur durant la période de chauffage vaut en moyenne $Te = 4{,}0$ °C. Pendant la période de chauffage, l'intérieur de la maison est maintenu à une température constante $Ti = 19$ °C grâce au système de chauffage.

On estime la durée annuelle de chauffage à 120 jours et que le chauffage représente 60 % de la consommation d'énergie annuelle.

DOC 4 Flux thermiques moyens lorsque $Te = 4{,}0$ °C et $Ti = 19$ °C



QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Les transferts thermiques s'effectuent selon trois modes de transfert. Citer ces trois modes et donner pour chacun ses caractéristiques.
2. Dans le cas où une paroi est constituée de plusieurs couches de matériaux d'épaisseurs et de conductivités différentes, les résistances thermiques de chaque couche s'additionnent.

   Calculer la résistance thermique de la toiture notée R_{th}(toit) et en déduire que le flux thermique moyen à travers le toit en hiver est égal à $\Phi_{toit} = 7{,}0 \times 10^2$ W.

   Donnée : *expression de la résistance thermique :* $R = \frac{e}{\lambda \cdot S}$ *avec e épaisseur (en m) et S surface (en m²) de la paroi*

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

Afin de conserver une température constante dans l'habitation, la puissance moyenne du système de chauffage doit être égale au flux thermique moyen sortant de la maison.

Déterminer la classe énergétique de l'habitation.

Il est attendu une prise d'initiatives et une présentation de la démarche suivie même s'il elle n'a pas abouti.

Exercice de numéro bleu : solution en fin de manuel, corrigé détaillé en version numérique

46 Tapis de sol pour randonnée

RÉSOLUTION DE PROBLÈME

30 min

ANALYSER Choisir un modèle ou des lois pertinentes

Entre deux tapis de sol en mousse proposés à la vente sur un site d'articles de sport, le « isotapis » et le « thermoplus », un randonneur pense acquérir le premier.

DOC 1 Documentation sur les tapis de sol en mousse

Lorsque vous posez votre sac de couchage à même le sol et que vous vous allongez, vous écrasez votre sac de couchage ce qui le rend inefficace. En contact avec un sol froid, vous perdez de l'énergie par transfert thermique. L'utilisation d'un matelas de sol, qui conserve son épaisseur et sa capacité d'isolation même soumis à la pression, limite ce phénomène ».

DOC 2 Caractéristique du matelas « isotapis »

Conductivité thermique : $\lambda = 0{,}03\ W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$;
dimensions : 193 cm × 62 cm × 1,1 cm.



DONNÉES

- température de l'air et du sol : 15 °C
- température de la peau : 33 °C
- expression de la résistance thermique : $R = \frac{e}{\lambda \cdot S}$ avec e épaisseur (en m) et S surface (en m^2) de la paroi.

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

Le randonneur souhaite comparer les capacités d'isolation thermique des deux matelas de sol en se plaçant dans les mêmes conditions d'utilisation. Pour simplifier, il fait l'hypothèse que les résistances thermiques des vêtements et du sac de couchage sont négligeables.

Après avoir calculé le flux thermique ϕ traversant le matelas « isotapis » et sachant que dans les mêmes conditions celui du matelas « thermoplus » est de 40 W, identifier, en justifiant, le matelas qui possède les meilleures capacités d'isolation thermique.

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. a. Indiquer dans quel sens se fait le transfert thermique à travers le matelas lorsque le randonneur est allongé.
   b. Nommer le phénomène de transfert thermique et le décrire à l'échelle microscopique.
2. Estimer la surface du corps humain au contact du matelas pour ne retenir qu'une des 4 valeurs suivantes :
   0,005 m^2 0,05 m^2 0,5 m^2 5 m^2

VERS LE SUP'

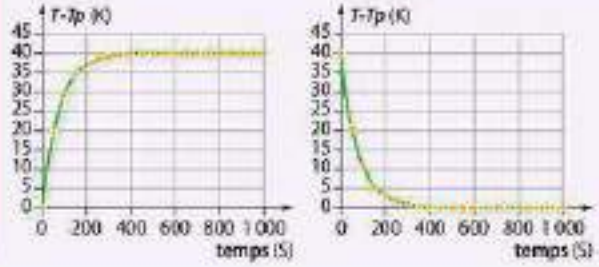
47 Chauffe puis refroidissement

Un liquide est contenu dans un récipient dont les parois sont à température constante T_p. Dans une 1re expérience on chauffe le liquide à l'aide d'une résistance chauffante de puissance $P = 96{,}0$ W. Dans une 2e expérience, on coupe le dispositif de chauffage.

Données : *masse volumique du fluide $\rho = 1{,}33 \times 10^{-2}\ kg \cdot m^{-3}$; volume du fluide $V = 0{,}1$ L ; capacité thermique massique du fluide 1 900 J · $kg^{-1} \cdot m^{-3}$.*

1. Lors de la chauffe, le bilan d'énergie conduit à l'équation différentielle suivante :
$$\rho \cdot V \cdot c \cdot dT/dt = -\alpha \cdot (T - T_p) + P$$
a. Montrer sans calcul que cette équation différentielle traduit le premier principe de la thermodynamique. α est une constante, identifier les autres termes.
b. Déterminer l'expression puis la valeur de $T - T_p$ quand la température est stabilisée.
c. En déduire la valeur de α et son unité.

2. a. En phase de refroidissement, montrer en quoi le bilan énergétique est modifié et donner l'expression de dT/dt.
b. Établir l'expression de $T - T_p$ en fonction du temps t par résolution de l'équation différentielle. On notera T_{max} la température initiale lors de la phase de refroidissement.
c. Le tracé de $\ln(T\text{-}T_p)$ (avec $T\text{-}T_p$ en Kelvin) en fonction du temps donne une droite d'équation $y = -1{,}33 \times 10^{-2} \times x + 3{,}68$ (avec x en seconde).
En déduire dans ce cas la valeur de α et son unité. Est-elle cohérence avec celle donnée lors de la phase de chauffe ?



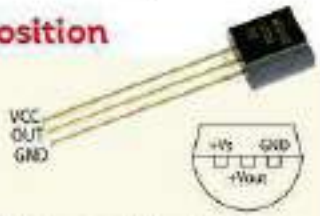
Loi thermique de Newton

Contexte

L'objectif est d'étudier l'évolution de la température de l'air initialement chauffé.

Documents mis à disposition

Caractéristiques et brochage du capteur LM35



LM35 est un capteur analogique de température, calibré en °C, qui fonctionne avec une tension d'alimentation comprise entre 4 V et 30 V. Le signal de sortie du capteur est proportionnel à la température. : une tension de + 10 mV correspond à 1 °C. Il peut mesurer des températures comprises entre - 40°C et + 110°C.

Matériel mis à disposition

- Une calculette type « collège » ou un ordinateur avec fonction « calculatrice »
- Un ordinateur muni de la console Arduino et d'un tableur grapheur
- Une carte Arduino et son câble USB
- Un capteur de température LM35
- Une plaque d'essai et des fils pour câbler le montage
- Un sèche-cheveux pour chauffer l'air ambiant

Travail à effectuer

1. (ANA) (RÉA) **Proposition de protocole expérimental** *(30 min conseillées)*

1. Représenter le câblage à mettre en œuvre pour mesurer la température ambiante à l'aide du capteur de température LM35 et de la carte Arduino relié à un ordinateur.





```
BORDAS_ECE_Arduino_et_loi_thermique_de_Newton

float volt ; // Définition de la tension
float temp ; // Définition de la température
void setup()
{
  Serial.begin(9600) ;
}
Void loop()
{
  valeur = analogRead(----------); //Mesure du capteur
  sur le port choisi
  tension = 5*valeur/1023 ;//Calcul de la température
  temp = tension/---------- ;//Calcul de la température
  Serial.println(temp) ;//Affichage de la température
  Delay(1000) ;//Durée entre deux mesures
}
```

2. Compléter le programme fourni.
3. Mesurer la température ambiante et donner son incertitude-type.
4. À partir des documents et de la liste du matériel disponible, proposer un protocole expérimental permettant de suivre l'évolution de la température de l'air après que celle-ci ait été chauffée à 60 °C à l'aide d'un sèche-cheveux.

Être en mesure de présenter le protocole

2. (RÉA) **Mise en œuvre du protocole expérimental proposé** *(20 minutes conseillées)*

1. Mettre en œuvre le protocole et effectuer l'acquisition de l'évaluation de la température en fonction du temps.
2. Modéliser la courbe expérimentale.

Être en mesure de présenter l'acquisition informatisée

3. (VAL) **Exploitation du résultat obtenu** *(10 minutes conseillées)*

1. Établir le bilan énergétique pour la phase de refroidissement.
2. Résoudre l'équation différentielle et donner l'expression de $T(t)$.

taux de variation de la température du système ($K \cdot s^{-1}$) → $\frac{dT}{dt} = -\gamma \cdot (T - T_{th})$ ← température du thermostat (K)

constante (s^{-1}) ↑

température du système (K) ↑

3. Dire si l'expression obtenue est en accord avec la modélisation expérimentale.
4. Identifier une source d'incertitude possible dans les mesures réalisées.

Défaire le montage et ranger la paillasse.

PISTE POUR LE GRAND ORAL PRÉPA BAC

Pour se préparer à l'Oral
➥ Livret LES CLÉS DU BAC
(en début de manuel)

UNE QUESTION

L'effet de serre est-il un avantage ou un inconvénient ?

Enjeu de la question

On parle souvent d'effet de serre à propos du réchauffement climatique. Or ce n'est pas l'effet de serre en lui-même qui pose problème.

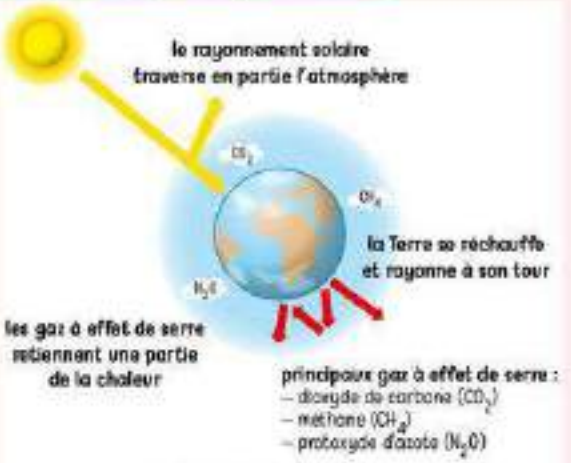
Proposition de plan de présentation

1. Définition de l'effet de serre. Ses causes.
2. Température sur Terre avec et sans effet de serre. Conclusion : pas de vie sur Terre sans effet de serre.
3. Le bon terme à utiliser : augmentation de l'effet de serre. Ses causes.
4. Conséquences néfastes de cette augmentation.
5. Conclusion : avantage de l'effet de serre, risques de son augmentation.

Les mots-clés

rayonnement infrarouge ▸ réchauffement climatique ▸ dioxyde de carbone ▸ gaz à effet de serre

Exemple de support de présentation



Principe de l'effet de serre

QUESTIONS D'APPROFONDISSEMENT POSSIBLES



UN EXEMPLE DE PROJET PROFESSIONNEL

Les métiers relatifs au développement durable sont des métiers d'avenir. La lutte contre les émissions de gaz à effet de serre devient une nécessité. Les énergies renouvelables permettent de réduire ces émissions mais aussi l'autonomie énergétique. C'est un secteur en pleine évolution car il convient d'intégrer constamment de nouvelles technologies.

Après le bac : *Bac + 5 : diplôme d'ingénieur ou master du domaine de l'énergie.*
Autres métiers : *Ingénieur environnement, ingénieur en énergie solaire, technicien thermicien…*

L'ingénieur recherche et développement travaille dans des bureaux d'étude d'entreprises ou dans des laboratoires de recherche pour améliorer et inventer des dispositifs utilisant des énergies renouvelables qui respectent les normes environnementales et permettent plus de compétitivité.



EXERCICES DE SYNTHÈSE

PRÉPA BAC

Exercice résolu

EN AUTONOMIE

20 min

1 Effet de serre

Le flux thermique solaire moyen $F_{solaire}$ reçu au sommet de l'atmosphère terrestre par le Soleil par unité de surface perpendiculaire aux rayons solaires (appelé aussi constante solaire) est connu. Il vaut en moyenne $F_{solaire} = 1\,368\ W \cdot m^{-2}$.

On dit que l'équilibre radiatif d'une planète est atteint quand sa température est constante. On a alors égalité entre le flux thermique par unité de surface émis par la planète et celui reçu par elle.



FIG 1 L'albédo de la Terre et de son atmosphère

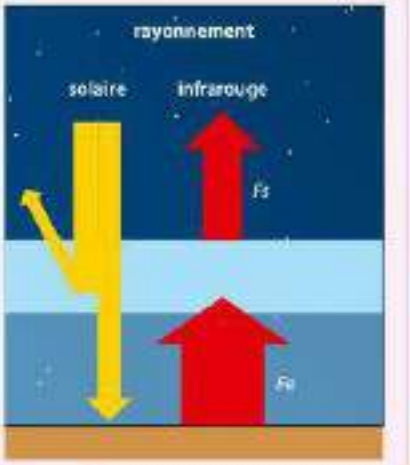


FIG 2 L'effet de serre

La Terre émet vers l'espace un flux thermique par unité de surface F_e plus faible que le flux thermique par unité de surface F_s émis par sa surface. L'effet de serre correspond à la différence entre ces deux flux thermiques.

1. Calculer la valeur du flux thermique solaire incident moyen par unité de surface $F'_{solaire}$ reçu au niveau de la surface de l'atmosphère terrestre. La démonstration s'appuiera sur un schéma.

DONNÉES

- La loi de Stéfan Boltzmann définit la relation qui existe entre le flux thermique par unité de surface F (en $W \cdot m^{-2}$) d'un objet et la température T de l'objet considéré :

$F = \sigma \cdot T^4$ avec $\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$

2. Déterminer l'albédo de la Terre et de son atmosphère. En déduire la valeur du flux solaire absorbée par unité de surface $F_{absorbée}$ par la Terre.

3. La température moyenne de la Terre est supposée constante.

3. 1. En déduire le flux thermique par unité de surface F_e émis vers l'espace par la Terre et son atmosphère.

3. 2. Sachant que la température moyenne à la surface de la Terre est de 15 °C, déterminer le flux thermique par unité de surface F_s émis par la surface de la Terre.

4. Donner l'expression de l'effet de serre G et donner sa valeur pour la Terre.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. Le flux thermique solaire se répartit sur la totalité de la surface de la Terre :

$\Phi = F_{solaire} \times$ Surface disque $= F'_{solaire} \times$ Surface Terre

$F_{solaire} \times \pi \times R_{atm}^2 = F'_{solaire} \times 4 \times \pi \times R_{atm}^2$

Donc $F_{solaire} = F'_{solaire}/4$

$F_{solaire} = 1\,368/4 = 342\ W \cdot m^{-2}$



2. L'albédo correspond à la proportion de l'énergie reçue par la Terre qui est réfléchie et n'est donc pas absorbée. D'après la figure 1, sa valeur est donc égale à A = 1/3.

Donc $F_{absorbée} = (2/3) \times F'_{solaire} = (2/3) \times 342 = 228\ W \cdot m^{-2}$

3. 1. La température de la Terre est constante. On a donc égalité entre le flux thermique par unité de surface émis par la Terre et celui reçu par elle.

Donc $F_e = F_{absorbée} = 228\ W \cdot m^{-2}$

3. 2. D'après la loi de Stéfan Boltzmann,

$F_s = \sigma \cdot T^4 = 5{,}67 \times 10^{-8} \times (273 + 15) = 390\ W \cdot m^{-2}$.

4. $G = F_s - F_e$

Pour la Terre : $G = F_s - F_e = 390 - 228 = 162\ W \cdot m^{-2}$

Exercice guidé EN AUTONOMIE

THÈME 3

30 min

2 Ballon de chauffage sanitaire

Plus de la moitié des logements produisent leur eau chaude de manière indépendante. Si l'on regarde la répartition selon l'énergie de production, l'électricité est la première source de production d'eau chaude sanitaire des résidences principales. La part de la consommation liée à l'eau chaude sanitaire (ECS) est en passe de devenir l'un des premiers postes de consommation dans les bâtiments résidentiels neufs. En effet, la réglementation thermique 2012 (RT2012) imposant une réduction très importante des besoins de chauffage, l'ECS devient donc prépondérante face aux autres usages.

DOC 2 Exemple de ballon d'eau chaude couramment installé dans les logements



DOC 1 Caractéristiques techniques d'un ballon d'eau chaude sanitaire

Cumulus électrique – gamme Waterplus

Capacité	Tension	Puissance	Temps de chauffe*	Constante de refroidissement**	Classe énergétique
200 L	230 V	2 200 W	5 h 17 min	0,18 Wh · jour^{-1} · K^{-1} · L^{-1}	C

Surface d'échange thermique
La surface S d'échange thermique du ballon avec le milieu extérieur est de 2,9 m^2. L'épaisseur des parois est négligeable.

Isolation extérieure
Le ballon est isolé par une couche de laine de roche d'épaisseur e = 70 mm et de conductivité thermique : 0,036 W · m^{-1} · K^{-1}.

* Temps de chauffe pour que l'eau du ballon passe de 15 °C à 65 °C.
** Constante de refroidissement pour un appareil réglé à 65 °C et une température ambiante de 20 °C.

DONNÉES

- Expression de la résistance thermique : $R = e / \lambda \cdot S$ avec e épaisseur (en m) et S surface (en m^2) de la paroi
- Capacité thermique massique de l'eau à 20 °C : $c_{eau} = 4\,180$ J · kg^{-1} · K^{-1}
- Masse volumique de l'eau liquide : $\rho_{eau} = 1\,000$ kg · m^{-3}
- L'énergie perdue par jour lorsque 1 L d'eau contenu dans le ballon perd un degré est proportionnelle à une constante caractéristique du ballon, la constante de refroidissement Cr qui s'exprime en Wh · jour^{-1} · K^{-1} L^{-1}. Par convention, pour la détermination de Cr, la température de stockage est choisie égale à 65 °C, avec une température de l'air ambiant de 20 °C.

1. Citer les modes de transfert thermique ayant lieux dans un ballon de chauffage sanitaire.

2. On chauffe l'eau du ballon de 15 °C à 65 °C (on néglige les pertes).
a. Calculer la durée nécessaire pour chauffer l'eau du ballon.
b. Vérifier que la valeur de cette durée est cohérente avec les caractéristiques fournies pour le ballon par le fabriquant.

Coups de pouce
L'énergie nécessaire pour chauffer l'eau du ballon est égale à $\Delta E = P \cdot \Delta t$.

3. Déterminer le flux thermique à travers les parois du ballon entre l'eau à 65 °C et l'air extérieur à 20 °C.

Le flux thermique dépend de la résistance thermique selon la relation : $\Phi = \Delta t / R$.

4. En déduire :
a. la valeur de l'énergie perdue par le ballon en une journée ; exprimer le résultat en Wh ;
b. la constante de refroidissement du cumulus. Le résultat est-il cohérent avec la donnée du fabriquant ?

Dans une journée il y a 24 h.

50 min

3 Un comprimé d'aspirine dans un verre d'eau

Un comprimé d'aspirine effervescent est mis dans un verre d'eau. Entre l'aspirine, principe actif du médicament, et l'ion hydrogénocarbonate HCO_3^- se produit une réaction dont l'équation est :

$$C_9H_8O_4 + HCO_3^- \rightarrow C_9H_7O_4^- + CO_2 + H_2O$$

Cette réaction sera considérée comme totale.



1. Étude de la réaction au laboratoire

On envisage de reproduire la réaction au laboratoire (Fig 1) en mettant en contact un comprimé d'aspirine 500 non effervescent, qui contient donc 500 mg de principe actif et une solution d'hydrogénocarbonate de sodium.

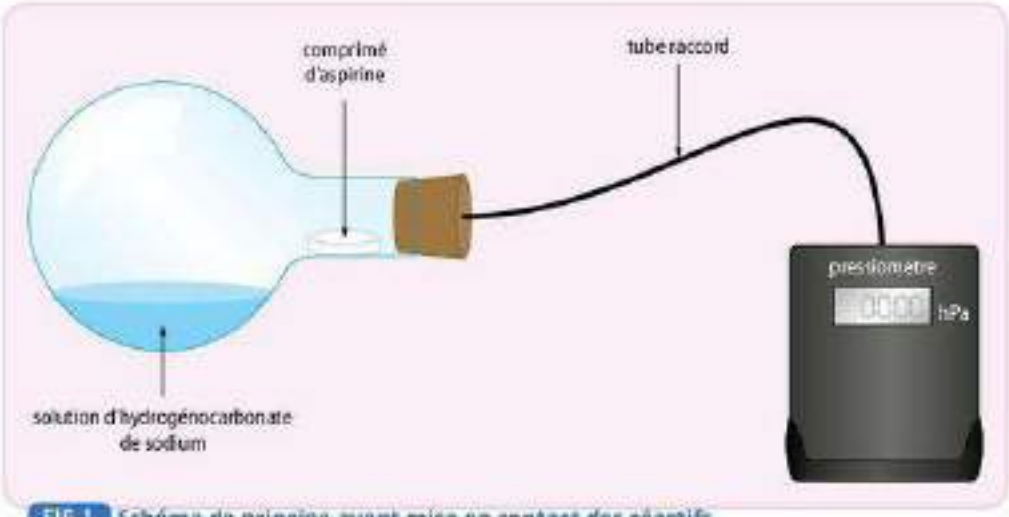


FIG 1 Schéma de principe avant mise en contact des réactifs

Lorsque le ballon est placé verticalement, le comprimé tombe dans la solution et la réaction « démarre ». L'apparition de dioxyde de carbone, en supplément de l'air déjà présent, crée une surpression P_{CO2} mesurée par le pressiomètre.

Le suivi expérimental de la pression donne lieu à la courbe ci-dessous (Fig 2).

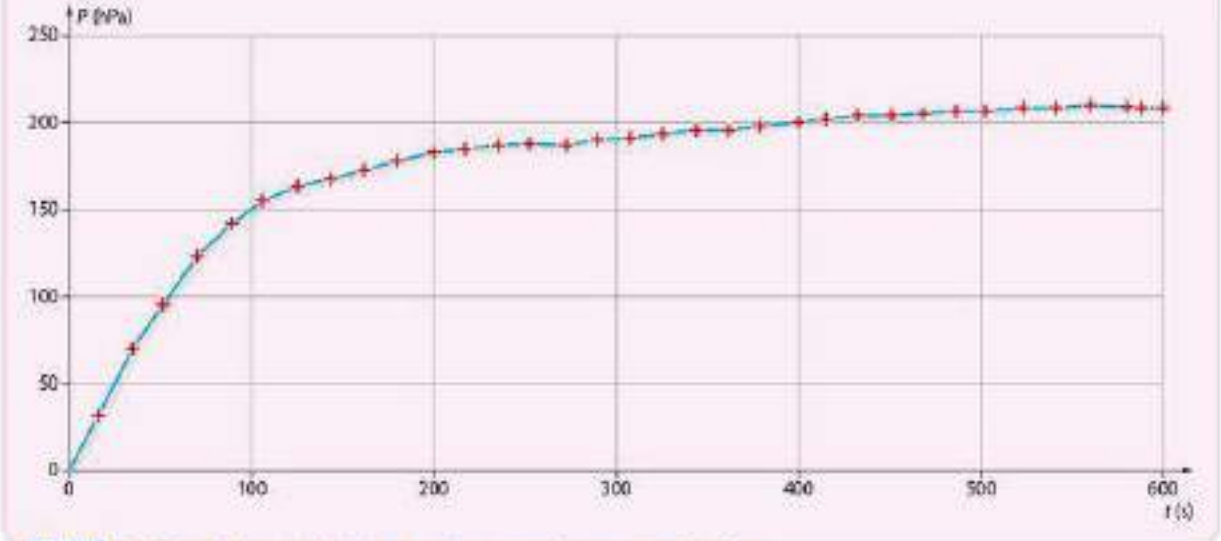


FIG 2 Suivi expérimental de la pression mesurée au pressiomètre

DONNÉES

- La surpression P_{CO_2} vérifie l'équation : $P_{CO_2} \cdot V = n_{CO_2} \cdot R \cdot T$

P_{CO_2} est exprimée en Pascal (Pa) ;
V correspond au volume de l'enceinte exprimé en m^3 ;
n_{CO_2} traduit le nombre de mole gazeuse de dioxyde de carbone, et s'exprime en mole ;
R est une constante de valeur 8,31 $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$;
T est la température en Kelvin, liée à la température en °C par la relation : $T(K) = \theta(°C) + 273$.

- Volume total de l'enceinte : 300 mL = $3{,}00 \times 10^{-4}$ m^3
- Température expérimentale : θ = 26 °C

1. Comment expliquer au niveau microscopique l'augmentation de la pression mesurée au pressiomètre ?

2. a. Montrer que si P_{CO_2} est exprimée en Pascal on a sensiblement : $n_{CO_2} = 1{,}21 \times 10^{-7} P_{CO_2}$ soit :
$n_{CO_2} = 1{,}21 \times 10^{-7} P_{CO_2}$ si on exprime la pression en hPa.

b. Dire quel modèle est utilisé dans cette étude et donner ses limites.

3. Peut-on estimer à partir de la courbe de la **figure 2** que la réaction est terminée ? Justifier votre réponse.

4. Déterminer la quantité de matière gazeuse formée au cours de la réaction.

5. a. Donner la relation entre la quantité de dioxyde de carbone formée n_{CO_2} et la quantité d'aspirine consommée n_{asp}.
b. En déduire la masse d'aspirine contenue dans le comprimé.
Comparer à la valeur indiquée.

2. Refroidissement à l'air libre de la solution obtenue

Le verre qui contient la solution obtenue initialement à 26 °C est laissé un moment sur une table extérieure alors que la température environnante est seulement de 5 °C. La solution se refroidit donc pour atteindre une température de 23 °C au bout de 5 minutes.

DONNÉES

- Loi de Newton : $\frac{dT(t)}{dt} = -\gamma(T(t) - T_{th})$
- $\frac{dT(t)}{dt}$: taux de variation de la température du système (en $K \cdot s^{-1}$)
- γ : constante (en s^{-1})
- $T(t)$: température du système au temps t (en K)
- T_{th} : température du thermostat (en K)



1. a. Peut-on dire que l'énergie de la solution présente dans le verre varie ?
b. Que se passe-il au niveau microscopique ?

2. a. Dire dans quel sens se fait le transfert thermique.
b. Identifier et caractériser le principal mode de transfert thermique mis en jeu.

3. a. Quelle est la valeur T_{th} dans le cas de l'étude ?
b. Résoudre l'équation différentielle en donnant l'expression de $T(t)$ en fonction de γ.
c. Donner l'allure générale de $T(t)$.

4. Déterminer la valeur numérique de la constante γ.

5. Si la solution est bue après être restée 10 minutes en extérieur, quelle est alors sa température ?

50 min

4 Flux thermique reçu du Soleil et conséquences

1. Température moyenne à la surface de la Terre

Le flux thermique moyen F reçu au sommet de l'atmosphère terrestre par le Soleil par unité de surface perpendiculaire aux rayons solaires (appelé aussi constante solaire) est connu. Il vaut en moyenne $F = 1\,368\ W \cdot m^{-2}$.

On dit que l'équilibre radiatif d'une planète est atteint quand l'énergie rayonnée est égale à l'énergie reçue.

La Terre et son atmosphère présentent un albédo $A = 0{,}30$.

DONNÉES

▸ La loi de Stéphan Boltzmann définit la relation qui existe entre le flux thermique par unité de surface F (en $W \cdot m^{-2}$) d'un objet et la température T de l'objet considéré comme un « corps noir », idéal qui émet sous forme d'un rayonnement toute l'énergie qu'il reçoit :

$$F = \sigma \cdot T^4 \text{ avec } \sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$$

1. En ne tenant pas compte de l'atmosphère terrestre, calculer la valeur du flux thermique P par unité de surface terrestre. La démonstration s'appuiera sur un schéma.

2. Dans la suite, on tient compte de l'albédo et de l'atmosphère terrestre.

a. Définir ce qu'on appelle un albédo.

b. Calculer la valeur du flux thermique F' par unité de surface réellement absorbé par la Terre.

3. a. Calculer la température moyenne à la surface de la Terre en considérant celle-ci comme un corps noir.

b. La température moyenne à la surface de la Terre est d'environ 15 °C. Comparer le résultat avec la valeur calculée précédemment et justifier l'écart constaté.

2. Température moyenne à la surface de la Terre

Perché à 1 535 m d'altitude, le « Grand Four Solaire » d'Odeillo est un laboratoire du CNRS (Centre national de la Recherche scientifique). D'un flux thermique de 1 000 kW au foyer, il est à ce jour le four solaire le plus puissant au monde.



Situé dans le sud de la France, à 74 km de Perpignan, la commune de Font-Romeu-Odeillo-Via bénéficie d'un ensoleillement exceptionnel. Elle est également célèbre pour la pureté de son air.

A. Principe de fonctionnement

La lumière du Soleil est captée par 63 héliostats (Fig 1). De 45 m^2 chacun. Ils sont mobiles suivant deux axes pour suivre le mouvement apparent du Soleil tout en réfléchissant les rayons vers un grand miroir parabolique fixe, aussi appelé concentrateur. Les rayons réfléchis par les héliostats, parallèles à un axe Nord-Sud, éclairent toujours la même surface du concentrateur. Réfléchis une deuxième fois par la parabole du concentrateur, il viennent enfin se concentrer dans un foyer situé 18 m en avant où la tache lumineuse obtenue fait seulement 40 cm de diamètre. À ce niveau, la température peut atteindre 3 400 °C.

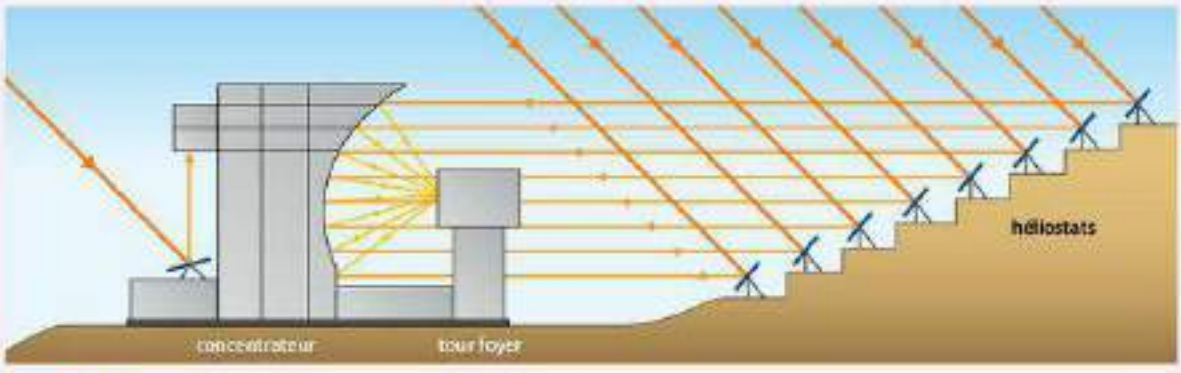


FIG 1 Schéma de principe

DONNÉES

- Le concentrateur (ou parabole) de superficie totale 1 830 m^2 est constitué de 9 130 miroirs.
- Les héliostats de superficie totale 2 835 m^2 est constitué de 11 340 miroirs.
- La réflectivité des miroirs des héliostats, ainsi que celle du concentrateur, est estimé à 70 %. Elle correspond au pourcentage incident qui est réfléchi par la surface du matériau.
- Le flux thermique reçu par unité de surface de miroir pendant l'utilisation du « Grand Four Solaire » est de 710 $W \cdot m^{-2}$.

1. Exprimer, puis calculer, le flux thermique réfléchi par l'ensemble des héliostats.
2. Montrer que la valeur du flux thermique au foyer est bien égale à la valeur annoncée.

B. Une expérience étonnante

Pendant la phase de mise au point du « Grand Four Solaire », des expériences ont été réalisées pour tester ses performances.

Une plaque en acier de 10 mm d'épaisseur, positionnée au foyer et soumise au rayonnement solaire concentré, a ainsi été percée d'un trou de diamètre 40 cm égal à celui de la tache lumineuse en seulement 1 minute et 27 seconde (Fig 2).

DONNÉES

- L'acier est un mélange principalement composé de fer et de carbone. Ses caractéristiques variant en fonction de sa composition, on utilisera les valeurs moyennes suivantes :
  - température de fusion : 1 500 °C.
  - température d'ébullition : 2 800 °C.
  - masse volumique à l'état solide : $\rho = 7\,200\ kg \cdot m^{-3}$.
  - capacité thermique massique à l'état solide : $c = 460\ J \cdot kg^{-1} \cdot °C^{-1}$.
  - énergie nécessaire à la fusion de 1 kg de cet acier : $L_f = 2{,}50 \times 10^5\ J \cdot kg^{-1}$.
- L'énergie E transmise lors de la fusion d'un échantillon de masse m à température constante est donnée par la relation : $\Delta U_f = m \cdot L_f$.
- Le volume d'un cylindre de longueur e et de rayon R est : $V = \pi \cdot R^2 \cdot e$.

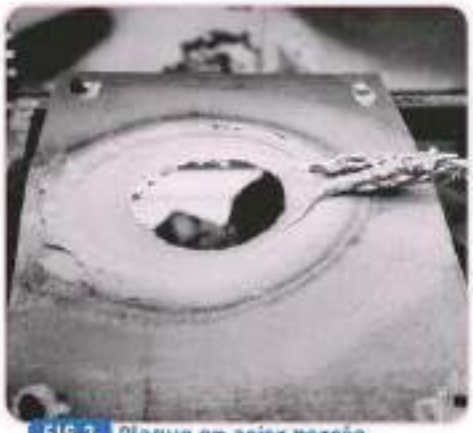


FIG 2 Plaque en acier percée sous rayonnement solaire

1. Montrer que la masse m d'acier fondu est de l'ordre de 9 kg.
2. a. Estimer l'énergie nécessaire pour élever la température de l'acier jusqu'à sa température de fusion. On supposera que la température initiale de l'acier était celle de l'air ambiant de 20 °C.

b. Estimer l'énergie nécessaire à la fusion de l'acier.

c. En déduire la durée nécessaire théorique pour réaliser cette expérience.

d. Comparer avec la valeur expérimentale et expliquer la différence en identifiant les transferts thermiques qui n'ont pas été prise en compte dans le modèle.

Avant d'aborder le chapitre EN AUTONOMIE

LES ACQUIS INDISPENSABLES

1re Enseignement de spécialité · 1re Enseignement scientifique

- L'intensité sonore exprime la puissance par unité de surface transportée par l'onde sonore :

$$I = \frac{P}{S}$$

I : intensité sonore ($W \cdot m^{-2}$) ; P : puissance sonore délivrée par la source (W) ; S : surface (m^2)

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

L : niveau sonore (dB) ; I : intensité sonore ($W \cdot m^{-2}$) ; I_0 : intensité sonore du seuil d'audibilité : $I_0 = 1{,}0 \times 10^{-12}\ W \cdot m^{-2}$

- La célérité d'une onde rend compte de la distance parcourue par l'onde par unité de temps.

$$c = \frac{d}{\Delta t}$$

c : célérité de l'onde ($m \cdot s^{-1}$) ; d : distance parcourue par la perturbation (m) ; Δt : *Retard* ou durée pour parcourir par la distance d (s)

- La **période** T d'un phénomène périodique est la plus petite durée au bout de laquelle le phénomène se reproduit identique à lui-même.
- La **fréquence** f est le nombre de fois que se répète le phénomène périodique par seconde.

$$f = \frac{1}{T}$$

f : fréquence de l'onde (Hz) ; T : période (s)

- La **longueur d'onde** λ est la plus petite distance séparant deux points vibrant en phase. C'est aussi la distance parcourue par l'onde en une période T.

$$c = \frac{\lambda}{T}$$

c : célérité de l'onde ($m \cdot s^{-1}$) ; λ : longueur d'onde (m) ; T : période (s)

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

Pour chaque situation, rédiger une réponse qui explique en quelques lignes le raisonnement.

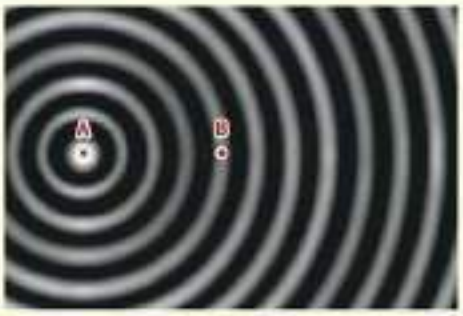
SITUATION 1

Un appareil de mesure relève une intensité sonore de $2{,}3 \times 10^{-3}\ W \cdot m^{-2}$ pour le casque audio d'un élève.

Sachant que le seuil de danger est de 85 dB, le niveau d'intensité sonore est-il raisonnable ?

SITUATION 2

Un vibreur provoque des ondes progressives sinusoïdales de fréquence 20 Hz à la surface de l'eau. Sur la photographie de la surface, ci-contre, la distance AB vaut 5,0 cm.



Déterminer la valeur de la longueur d'onde puis la célérité de cette onde.

CHAPITRE

17

PHYSIQUE

ondulatoires



Les casques avec réduction de bruit ont pris une place de plus en plus grande dans notre environnement. Comment expliquer le phénomène qui se produit lorsqu'on active ce système ?

– EXERCICE 21

NOTIONS ET CONTENUS

- Intensité sonore, niveau d'intensité sonore et atténuation.
- Diffraction d'une onde par une ouverture, angle caractéristique de diffraction.
- Interférences de deux ondes : interférences constructives et destructives.
- Interférences de deux ondes lumineuses : différence de chemin optique et interfrange.
- Effet Doppler.

CAPACITÉS EXPÉRIMENTALES

- Illustrer les atténuations géométrique et par absorption. – Activité 1
- Illustrer et caractériser expérimentalement le phénomène de diffraction. Exploiter la relation donnant l'angle caractéristique. – Activité 2
- Tester les conditions d'interférences de deux ondes. – Activité 3
- Exploiter l'expression donnée de l'interfrange dans le cas des ondes lumineuses. – Activité 4
- Exploiter l'expression du décalage Doppler en acoustique pour déterminer une vitesse. – Activité 5

CAPACITÉS MATHÉMATIQUES

- Utiliser la fonction logarithme décimal et sa fonction réciproque.

TP

COMPÉTENCES :
(RÉA) Utiliser un modèle
(ANA/RAI) Choisir, élaborer, justifier un protocole

Atténuation en dB



LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

Un citadin, vivant près d'une voie rapide très fréquentée, se plaint des nuisances sonores ambiantes.

Quelles solutions peut-il mettre en œuvre ?
Les illustrer en s'appuyant sur des expériences.

LISTE DU MATÉRIEL

- GBF + haut-parleur, fils, mètre ruban, sonomètre, chambre sourde, lot de matériaux différents.
- Un smartphone, avec une application permettant l'émission d'un son ou une application sonomètre, peut aussi être utilisé.

DOC 1 Source sonore

Une source sonore est *omnidirective* si le niveau d'intensité sonore est le même dans toutes les directions. Une source est *directive* s'il existe des directions d'émissions privilégiées.

La référence du niveau d'intensité sonore est prise à 1 m de la source sonore.

DOC 2 Atténuation géométrique

L'atténuation géométrique dépend de la géométrie des lieux, certaines formes favorisant les réflexions des ondes ou bien leur dissipation, mais aussi de la distance à la source sonore. Le niveau d'intensité sonore s'exprime en fonction de la distance x de la source :

$$L(x) = L_{(\text{à } 1 \text{ m})} - 20 \log x.$$

DOC 3 Atténuation par absorption

Les molécules présentes dans l'air vibrent lors de la propagation du son. Elles dissipent une partie de l'énergie sous forme de chaleur. Cette dissipation augmente avec la fréquence, et dépend de l'humidité de l'air.

L'absorption d'une onde sonore dépend aussi de la nature des matériaux (poreux, creux, pleins...) qu'elle doit traverser lors de sa propagation.

DOC 4 Chambre sourde

Une chambre sourde, ou anéchoïque, est une pièce permettant de mesurer le niveau d'intensité sonore d'un son sans avoir les perturbations dues aux réflexions sur les parois.



VOCABULAIRE

- **Atténuation en dB :** entre deux positions 1 et 2, l'absorption en décibel s'écrit : $A_{dB} = L_1 - L_2$
- **Humidité relative :** l'humidité relative compare la quantité d'eau présente dans l'atmosphère à la quantité qu'il faudrait pour saturer cet air en eau. Elle dépend de la température.

Je réussis si...

- **Je sais illustrer l'atténuation géométrique et l'atténuation par absorption.**

2. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE

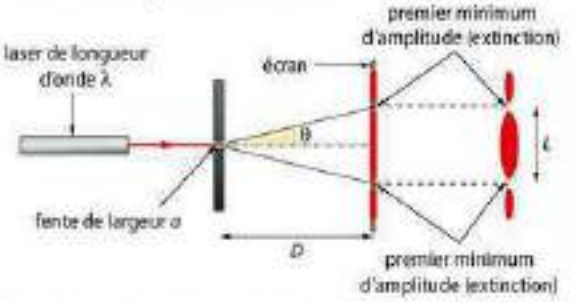
TP

COMPÉTENCES :
(RÉA) Mettre en œuvre un protocole expérimental
(VAL) Identifier des sources d'erreur, estimer une incertitude, comparer à une valeur de référence

Diffraction

En exploitant le phénomène de la diffraction, déterminer la taille de l'ouverture en précisant la méthode qui est la plus précise.

DOC 1 **Pour déterminer l'angle caractéristique de diffraction**



L'angle caractéristique de diffraction est défini par :

$$\theta = \frac{\lambda}{a}$$

Dans l'approximation des petits angles, en utilisant la relation trigonométrique de la tangente, on trouve :

$$\tan\theta \approx \theta = \frac{L}{2D}$$

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL 1

Pour déterminer la taille d'une ouverture

On éclaire l'ouverture (trou ou fente de taille a fournie par le constructeur) avec un laser de longueur d'onde 650 nm.

- Mesurer la distance L de la tâche centrale entre les premiers minimas d'amplitude, le plus précisément possible, en mesurant la distance entre deux minimas consécutifs secondaires : $2L = \frac{L}{2} + L + \frac{L}{2}$;



PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL 2

Déterminer la taille d'une ouverture par un logiciel de traitement d'image

On éclaire la même ouverture avec le même laser.

- Enregistrer l'image de la tâche de diffraction à l'aide d'une webcam (penser à montrer l'échelle de distance).
- Grâce au logiciel de traitement d'image, déterminer la distance L de la tâche centrale entre les premiers minimas d'amplitude, avec le plus de soin possible.

DOC 2 **Exemple de courbe d'intensité obtenue**



MESURES ET ANALYSE

Détermination de la taille de l'ouverture

On considère une fente. Par deux méthodes de mesures expérimentales proposées par les protocoles 1 et 2 :

1. déterminer la taille de l'ouverture a de cette fente ;
2. déterminer les incertitudes-types des grandeurs qui interviennent et calculer l'incertitude-type $u(a)$ sur la taille de l'ouverture (VOIR FICHE MÉTHODE ➡ p. 538).

DONNÉE

$$u(a) = a \times \sqrt{\left(\frac{u(\lambda)}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{u(L)}{L}\right)^2 + \left(\frac{u(D)}{D}\right)^2}$$

CONCLUSION

Comparer avec la valeur de référence du constructeur en utilisant la relation :

$$\frac{a_{mes} - a_{ref}}{u(a)}$$

où $u(a)$ est l'incertitude-type associée au résultat.

Conclure sur la méthode qui donne la valeur de l'ouverture la plus proche de celle fournie par le constructeur.

Je réussis si...

- **Je sais mettre en œuvre un protocole expérimental pour déterminer un angle caractéristique.**
- **Je sais évaluer une incertitude-type composée, la formule étant fournie.**

TP

COMPÉTENCES :
ANA/RAI Proposer une stratégie de résolution
COM Présenter une démarche de manière argumentée et cohérente à l'oral

Interférences de deux ondes à la surface de l'eau

Les ondes à la surface de l'eau permettent d'observer le phénomène d'interférences.

SITUATION-PROBLÈME

Mettre en œuvre une démarche pour tester les conditions d'interférences constructives ou destructives à la surface de l'eau dans le cas de deux ondes issues de deux sources ponctuelles en phase.

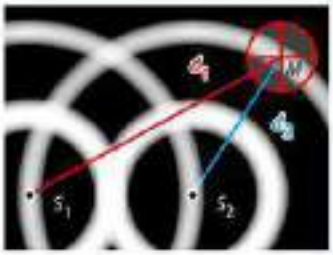
DOC 1 Phénomène des interférences

Le phénomène des interférences est dû à l'addition de vibrations de **même longueur d'onde**, et qui ont un déphasage constant : on dit qu'elles sont **cohérentes ou synchrones**.

On parle d'interférences constructives lorsque les amplitudes des ondes interférant s'ajoutent au point considéré, et d'interférences destructives lorsqu'elles s'annulent.

Ce phénomène est bien connu avec les ondes radio : ce sont ces parasites reçus par notre poste de radio lorsque deux ondes de même fréquence se superposent. Cela existe aussi avec le son et la lumière.

DOC 2 Conditions d'interférences



On définit la différence de chemin δ en un point M, la différence de distance du point M aux deux sources :

$\delta = d_1 - d_2$.

On observe des interférences *destructives* si δ est un multiple de la demi-longueur d'onde $\frac{\lambda}{2}$.

On observe des interférences *constructives* si δ est un multiple de la longueur d'onde λ.

DOC 3 Programme pour approcher la somme de deux fonctions sinusoïdales

```
from pylab import*

x = linspace(0, 2*pi, 30)
y1 = sin(x)
y2 = sin(x + 3*pi/2)
y3 = y1 + y2
plot(x, y1, label = "sin(x)")
plot(x, y2, label = "sin(x + dephasage")
plot(x, y3, label = "sin(x) + sin(x + dephasage)")
legend()

show()
```

Dans l'expression d'une fonction telle que $\sin(x + \varphi)$, φ représente le *déphasage angulaire, en radians*, de la fonction par rapport à la fonction $\sin(x)$.

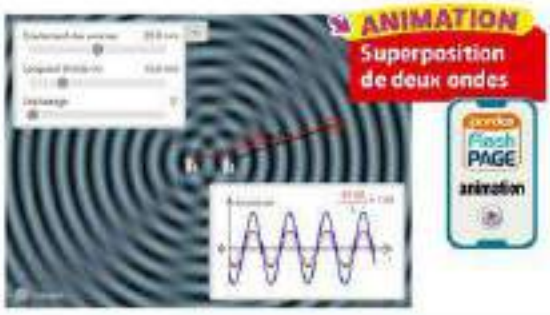
DOC 4 Cuve à ondes

Pour comprendre le phénomène des interférences à la surface de l'eau, le recours à une cuve à ondes peut être utile. Voici le principe d'utilisation, en vidéo.



DOC 5 Superposition de deux ondes à la surface de l'eau

L'animation ci-dessous explique le principe de superposition de deux ondes à la surface de l'eau.



Je réussis si...

- **Je sais tester les conditions d'interférences constructives/destructives à la surface de l'eau dans le cas de deux ondes ponctuelles en phase.**
- **Je sais représenter, à l'aide d'un langage de programmation, la somme de deux signaux sinusoïdaux périodiques synchrones en faisant varier la phase de l'un des deux.**

TP

COMPÉTENCES
(REA) Mettre en œuvre un protocole expérimental
(VAL) Estimer une incertitude

Résolution de l'écran d'un smartphone par interférences

L'écran d'un téléphone est subdivisé en pixels. À partir du phénomène d'interférences, il est possible de déterminer expérimentalement la taille d'un pixel et d'en déduire la résolution de l'écran.



PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Pour déterminer la taille du pixel

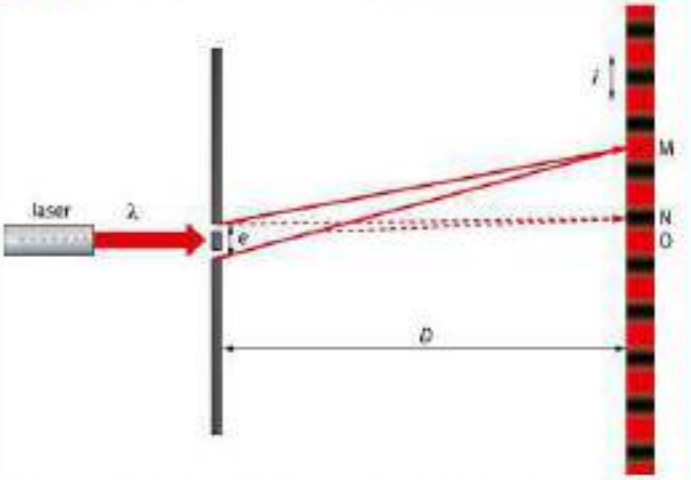
- L'écran du smartphone est constitué d'un quadrillage de pixels très petits, que l'on peut considérer comme autant de carrés réfléchissants accolés.
- Éclairer un écran de smartphone avec un laser.
- Par réflexion, repérer la figure d'interférence sur un écran.
- Mesurer le plus précisément possible l'interfrange i entre deux points lumineux.

VOCABULAIRE

Interfrange : c'est la distance i entre le milieu de deux franges brillantes ou deux franges sombres.

Résolution (en dpi) : c'est le nombre de pixels par pouce que peut afficher un écran, un pouce valant 2,54 cm.

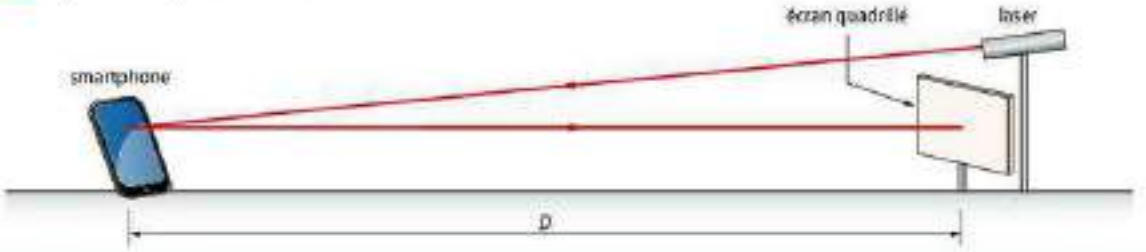
DOC 1 Pour déterminer l'interfrange



On peut relier la distance i entre deux points lumineux présents sur l'écran quadrillé à la distance e séparant les centres de deux pixels accolés de l'écran du smartphone par la relation :

$$i = \frac{\lambda D}{e}$$

DOC 2 Dispositif expérimental



MESURES ET ANALYSES

1 Détermination de l'interfrange

a. Réaliser le protocole expérimental permettant de déterminer l'interfrange.

b. Détailler le protocole pour estimer l'incertitude-type, de type A, sur l'interfrange (VOIR FICHE MÉTHODE ➡ p. 538).

2 Détermination de la taille du pixel

En utilisant le document 1, déterminer la taille du pixel de l'écran du smartphone.

CONCLUSION

Donner la résolution de l'écran de votre smartphone. Comparer avec des valeurs de résolution courantes en prenant en compte les incertitudes de mesures.

Je réussis si...

- **Je sais exploiter l'expression donnée de l'interfrange dans le cas des interférences de deux ondes lumineuses.**

5. ACTIVITÉ EXPÉRIMENTALE

TP

COMPÉTENCES :
(RÉA) Effectuer des procédures courantes (collecte de données, calcul)
(VAL) Faire preuve d'esprit critique

Effet Doppler

L'effet Doppler est un phénomène physique qui peut, quand un émetteur d'ondes est en mouvement par rapport à un observateur, être utilisé pour la mesure de vitesse.

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Détermination d'une vitesse par effet Doppler à l'aide d'un logiciel de traitement du son ou d'une application dédiée pour smartphone

- Ouvrir l'enregistrement sonore du klaxon d'une voiture à l'arrêt.

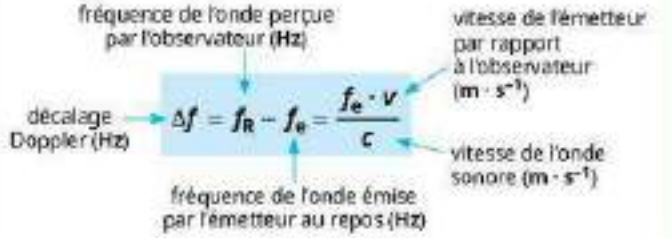
Déterminer la fréquence du son à l'arrêt

- Ouvrir l'enregistrement sonore d'une voiture qui se déplace à une vitesse v en émettant le son du klaxon.

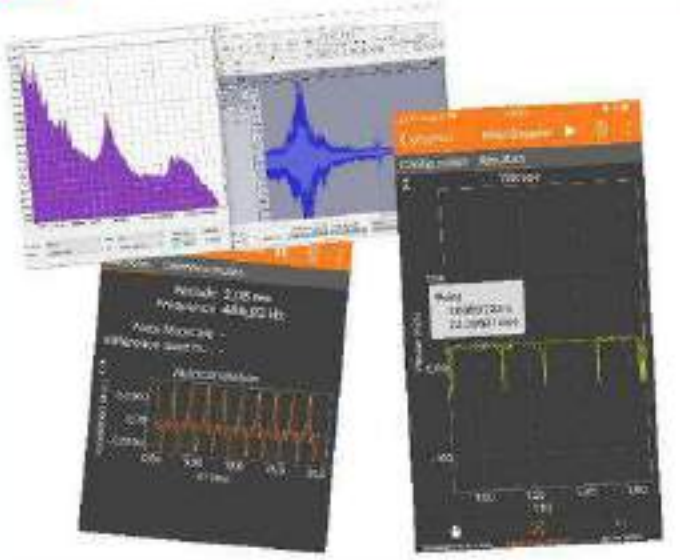
Déterminer la fréquence du son quand la source se déplace.

DOC 1 Expression du décalage Doppler

L'effet Doppler est une variation de fréquence de l'onde perçue par un observateur, s'il est en mouvement par rapport à la source ou si la source est en mouvement par rapport à lui. Le décalage **Doppler** Δf s'écrit alors :



DOC 2 Exemples de résultats



DOC 3 Animation sur le principe de l'effet Doppler



DONNÉE

- célérité du son dans l'air : $c = 340\ m \cdot s^{-1}$.

MESURES ET ANALYSES

Détermination de la vitesse

On considère que la voiture se déplace sur une route départementale, limitée à $80\ km \cdot h^{-1}$. Par deux méthodes de mesure expérimentale, et à l'aide des (FICHE MÉTHODE ➥ p. 556 ET FICHE PRATIQUE ➥ p. 588), déterminer si le conducteur respecte le Code de la route.

CONCLUSION

Comparer les deux méthodes expérimentales et argumenter sur celle qui permet de déterminer le plus efficacement et précisément la vitesse d'un véhicule en déplacement.

Avoir un regard critique sur les incertitudes de mesures.

Je réussis si...

- **Je sais mettre en œuvre un protocole expérimental pour déterminer une vitesse.**
- **Je sais exploiter l'expression du décalage Doppler en acoustique.**

1 Niveau d'intensité sonore

L'intensité sonore I et le niveau d'intensité sonore L

L'intensité sonore correspond à l'énergie transportée par l'onde sonore par unité de temps et de surface. Elle s'exprime en watt par mètre carré ($W \cdot m^{-2}$).

La valeur minimale audible, appelée seuil d'audibilité, vaut $I_0 = 1{,}0 \times 10^{-12}\ W \cdot m^{-2}$. La valeur maximale, appelée seuil de douleur, vaut $1\ W \cdot m^{-2}$.

L'étendue de l'intensité sonore étant considérable, on préfère utiliser une échelle logarithmique, qui représente mieux la perception visuelle de l'oreille humaine, en introduisant le niveau d'intensité sonore (FIG. 1). Il est noté L, comme level qui signifie niveau en anglais, et est exprimé en décibel (dB) :

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

- L : niveau d'intensité sonore (dB)
- I : intensité sonore ($W \cdot m^{-2}$)
- I_0 : intensité sonore de référence ($W \cdot m^{-2}$)

Atténuation

Plus la distance entre la source et le récepteur augmente plus le niveau d'intensité sonore diminue : on parle **d'atténuation géométrique** (FIG. 2). D'autre part, on parle **d'atténuation par absorption** lorsqu'un matériau est interposé entre la source et le récepteur, ce qui amoindrit l'intensité sonore.

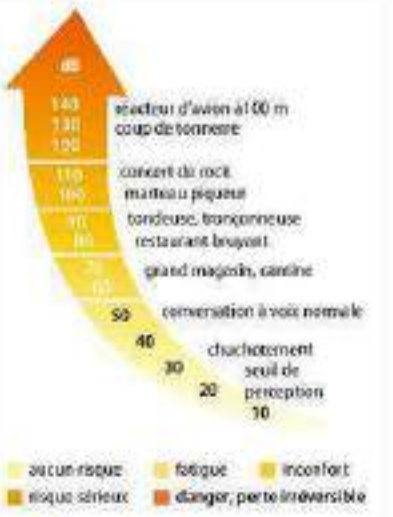
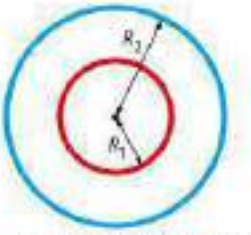


FIG. 1 Échelle de niveau d'intensité sonore.



Prenons un milieu homogène illimité et une source rayonnante dans toutes les directions. L'énergie émise est conservée, mais se répartit sur des sphères de plus en plus grandes.

FIG. 2 Atténuation géométrique : répartition de la même puissance sur deux sphères de rayons différents.

2 Diffraction d'une onde

Conditions d'observation

Lorsqu'une onde mécanique plane rencontre une ouverture, dont la taille est inférieure ou égale à sa longueur d'onde, il se produit un phénomène de **diffraction**. L'onde se transforme en onde circulaire, ce qui crée une vibration qui se propage dans une région plus vaste que l'ouverture seule (FIG. 3).

Ce phénomène se produit aussi lorsqu'un faisceau laser rencontre une fente suffisamment fine. Après l'ouverture, au lieu de rester confiner à la dimension de l'ouverture, le faisceau s'éparpille : on obtient plusieurs tâches lumineuses alternant la lumière et l'obscurité (FIG. 4). Ce phénomène, commun aux ondes mécaniques et lumineuses, décrit la lumière comme une onde.

Caractéristiques de la diffraction

Le phénomène de diffraction (FIG. 5) dépend de la dimension de l'ouverture a et de la longueur d'onde λ. Il est d'autant plus marqué que a est voisin ou inférieur à λ.

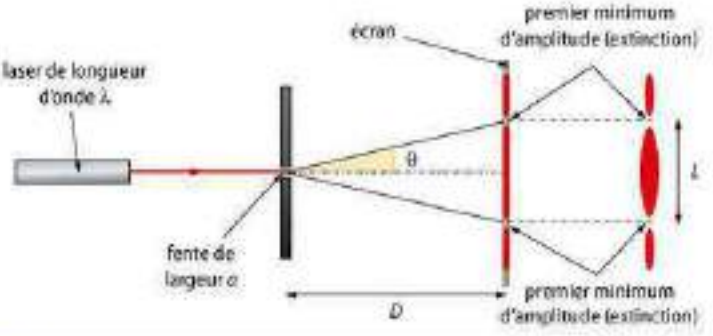


FIG. 5 Diffraction de la lumière d'un laser par une ouverture de dimension a.

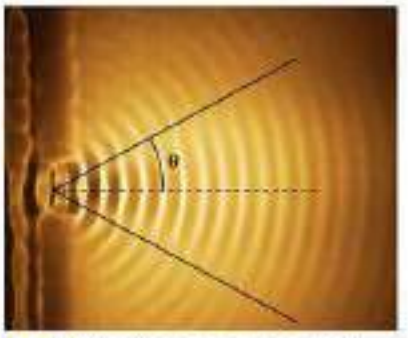


FIG. 3 Diffraction d'une onde mécanique plane sur l'eau.

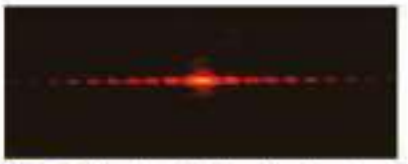


FIG. 4 Diffraction de la lumière d'un laser.

Angle caractéristique de la diffraction θ

On exprime l'**angle caractéristique de la diffraction** θ comme le demi-angle délimitant les premiers minima d'amplitude (FIG. 5). Il s'exprime en radian (rad).

L'angle caractéristique vérifie la relation :

$$\theta = \frac{\lambda}{a}$$

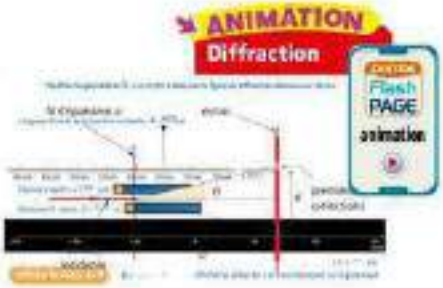
θ : angle caractéristique de diffraction (rad) ; λ : longueur d'onde (m) ; a : taille de l'ouverture (m)

EXEMPLE

Pour trouver le diamètre d'une ouverture, il suffit de mesurer la tâche centrale L avec une règle, la distance fente-écran D, et lire sur le laser la longueur d'onde λ. On utilise l'approximation des petits angles :

$$\tan\theta \approx \theta = \frac{\frac{L}{2}}{D} = \frac{\lambda}{a}$$

On isole a, ce qui donne $a = \frac{2\lambda \cdot D}{L}$.



3 Interférences de deux ondes

Conditions d'observation

Lorsque deux ondes mécaniques, de même longueur d'onde, se rencontrent, elles se superposent géométriquement : on constate par endroit qu'elles se renforcent en s'additionnant, et par ailleurs, elles s'annulent (FIG. 6A) : c'est le phénomène d'**interférences**.

Cela se produit aussi lorsque deux faisceaux de lumière issus d'une même source se superposent : on obtient sur un écran une alternance de zones brillantes et de zones sombres (FIG. 6B). Cela a beaucoup surpris les physiciens du XIXe siècle : lumière + lumière = obscurité !

Là encore, ce phénomène observé pour la lumière et pour les ondes mécaniques, confirme les propriétés ondulatoires de la lumière.

Pour être observées, il faut que les deux ondes respectent des **conditions d'interférences** :
– avoir la même longueur d'onde ou *fréquence*
– être synchrones (ou cohérentes), c'est-à-dire avoir un déphasage de l'une par rapport à l'autre constant.



FIG. 6 A interférences entre des ondes mécaniques à la surface de l'eau. B Interférences en lumière monochromatique

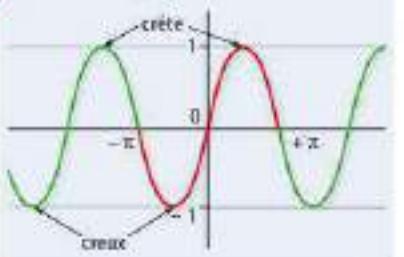
Interférences constructives et destructives

Une onde monochromatique peut être modélisée par une succession de creux et de crêtes, sous la forme d'une fonction sinusoïdale. La superposition de deux ondes de même longueur d'onde donne deux cas extrêmes.

– Si les creux et les crêtes coïncident, les deux ondes sont exactement décalées d'un multiple de la longueur d'onde λ : on dit que les **deux ondes sont en phase**. Lors de la superposition, les amplitudes des deux ondes s'ajoutent et l'onde résultante est renforcée : on parle d'**interférences constructives**.
– Si les creux d'une des ondes coïncident avec les crêtes de la seconde, les deux ondes sont précisément décalées d'un multiple de la demi-longueur d'onde $\frac{\lambda}{2}$, on dit que **les ondes sont en opposition de phase**. Lors de la superposition, les amplitudes des deux ondes s'annulent, on parle d'**interférences destructives** (FIG. 7).

UN PONT VERS LES MATHS

La fonction sinus est une courbe qui alterne crête et creux.



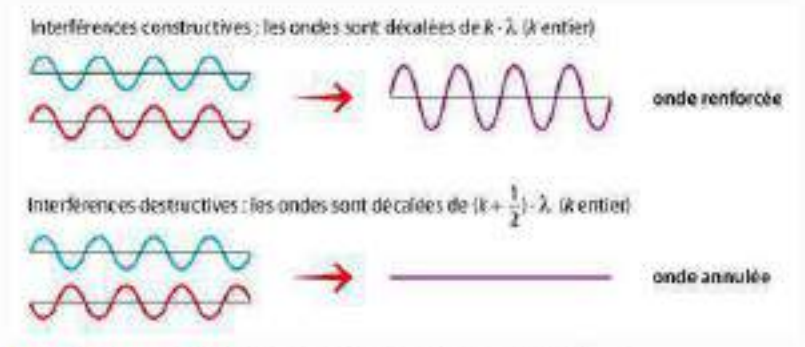


FIG. 7 Conditions d'interférences constructives ou destructives.



EXEMPLE

Le phénomène d'interférences est utilisé dans les casques à réduction de bruit : un micro interne détecte les ondes sonores ambiantes et crée un signal en opposition de phase de nature à annihiler le bruit ambiant.

Interférences de deux ondes lumineuses

Dans l'expérience des trous d'Young (FIG. 8), un faisceau laser de longueur d'onde λ, éclaire deux trous distants d'un écart e. Ils se comportent ainsi comme deux sources synchrones, notées S_1 et S_2 (FIG. 9).

La superposition en un point M de l'écran des deux ondes sinusoïdales dépend de la **différence de chemin optique**, notée δ, due au déplacement supplémentaire de la deuxième onde par rapport à la première :

$\delta = S_2M - S_1M = S_2S_1'$. Par relation trigonométrique dans l'approximation des petits angles, on peut écrire, dans le triangle IOM, $\tan\alpha \approx \alpha = \dfrac{x}{D}$

Mais aussi dans le triangle $S_1S_2S_1'$: $\sin\alpha \approx \alpha = \dfrac{\delta}{e}$



FIG. 8 Thomas Young (1773-1829) est un illustre physicien, mathématicien et médecin.

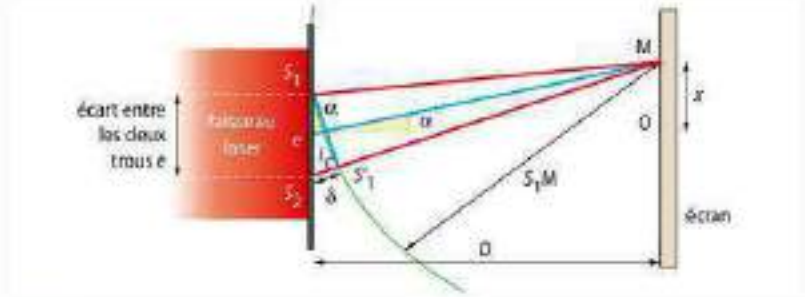


FIG. 9 Expérience des trous d'Young.

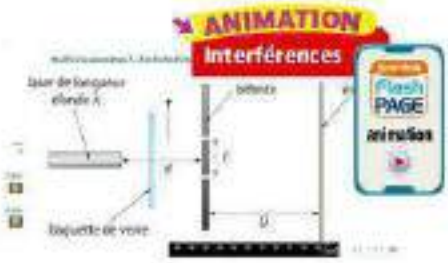
En égalisant les deux relations : $\alpha = \dfrac{x}{D} = \dfrac{\delta}{e}$, on obtient l'expression de la différence de chemin optique en fonction de l'abscisse x du point M :

$$\delta = \frac{e \cdot x}{D}$$

La plus petite valeur de x séparant deux points où des interférences constructives vont être observées s'appelle l'**interfrange**, noté i (FIG. 10). Elle s'obtient pour $\delta = \lambda$, la distance entre ces deux interférences constructives consécutives : $\lambda = \dfrac{e \cdot i}{D}$, ce qui permet d'obtenir l'expression de l'interfrange i :

longueur d'onde (m) → λ ; distance entre les deux fentes et l'écran (m) → D

interfrange (m) → $i = \dfrac{\lambda \cdot D}{e}$ ← écart entre les deux fentes (m) ← e



4 Effet Doppler

Définition

Lorsqu'un train klaxonne en passant dans une gare à vitesse importante : le son perçu est plus aigu quand il s'approche, et plus grave lorsqu'il s'éloigne.

L'effet Doppler est une variation de fréquence de l'onde perçue par un observateur, si la source est en mouvement par rapport à l'observateur. Le **décalage Doppler** est d'autant plus marqué que la vitesse de la source par rapport à l'observateur est grande.

Décalage Doppler

Considérons une source qui se rapproche à une vitesse v, faible devant la célérité c des ondes. À $t = 0$ s, elle émet une onde, de fréquence $f_e = \frac{1}{T_e}$ et de longueur d'onde λ_e (FIG. 10).

Pendant une durée égale à une période T_e, l'onde se déplace d'une longueur d'onde λ_e. Elle sera entendue à l'instant $t_1 = \frac{D}{c}$.

Pendant ce temps, la source avance d'une distance $d = v \times T_e$, et émet une deuxième onde à $t_2 = T_e$. L'onde n'a plus qu'à parcourir la distance $D - d$. On appelle t_3 l'instant où l'onde est reçue par l'observateur : $t_3 = T_e + \frac{D-d}{c}$.

Ainsi, le récepteur a reçu la première onde à l'instant t_1 et la deuxième onde à l'instant t_3.

La période de l'onde reçue est donc : $T_R = t_3 - t_1 = T_e + \frac{D-d}{c} - t_1 = T_e - \frac{d}{c}$

$$T_R = T_e - \frac{v \cdot T_e}{c} = T_e\left(1 - \frac{v}{c}\right) = T_e\left(\frac{c-v}{c}\right).$$

En prenant l'inverse pour obtenir la fréquence reçue $f_R = \frac{1}{T_R}$:

$f_R = f_e\left(\frac{c}{c-v}\right)$. On retrouve bien une fréquence perçue f_R plus grande que celle émise f_e, ce qui correspond à un son perçu plus aigu.

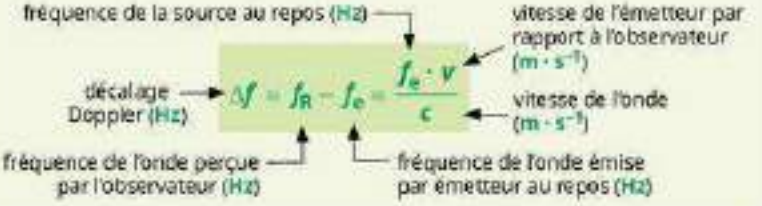
Bien entendu, si la source s'éloigne de l'observateur, il y a juste à permuter le signe $-v$ en $+v$:

$f_R = f_e\left(\frac{c}{c+v}\right)$. On retrouve bien une fréquence perçue $f_R < f_e$.

Le décalage Doppler Δf s'obtient en faisant la différence $\Delta f = f_R - f_e$:

$$\Delta f = f_R - f_e = f_e\left(\frac{c}{c-v} - 1\right) = f_e\left(\frac{v}{c-v}\right).$$

Si la vitesse v de la source est très faible devant la célérité c des ondes, alors $c - v \approx c$, le décalage Doppler s'écrit :



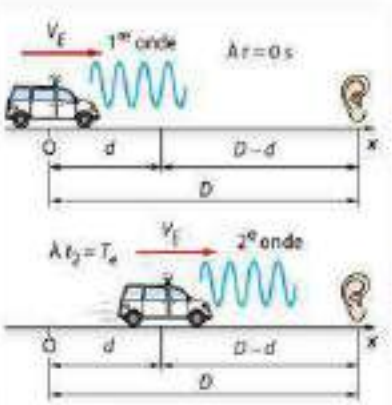
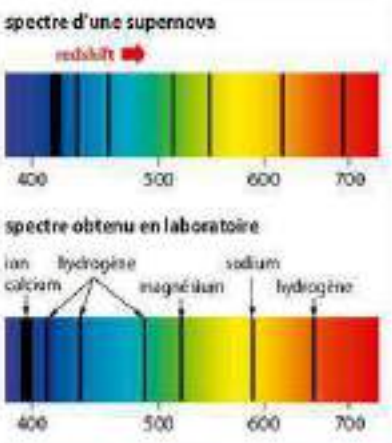


FIG. 10 A $t = 0$ s, émission de la 1re onde B à $t_2 = T_e$, émission de la 2e onde.



En astronomie, l'analyse du spectre de la lumière émise par une étoile permet de déceler le décalage en longueur d'onde par rapport au spectre de l'élément obtenu en laboratoire. Comme la longueur d'onde $\lambda = \frac{c}{f}$ est inverse de la fréquence, si l'étoile s'éloigne de la Terre, les longueurs d'onde sont supérieures à celles obtenues en laboratoire, on parle de décalage vers le rouge ou encore *redshift*.

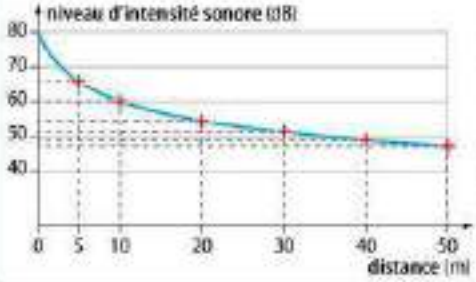
FIG. 11 Phénomène du *redshift*.

1 Niveau d'intensité sonore

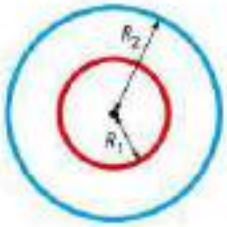
niveau d'intensité sonore (dB) → $L = 10 \log \frac{I}{I_0}$ ← intensité sonore ($W \cdot m^{-2}$)
← intensité sonore de référence ($W \cdot m^{-2}$)

$I = I_0 \cdot 10^{\frac{L}{10}}$

Atténuation géométrique



Prenons un milieu homogène illimité et une source rayonnante dans toutes les directions. L'énergie émise est conservée, mais se répartit sur des sphères de plus en plus grandes.

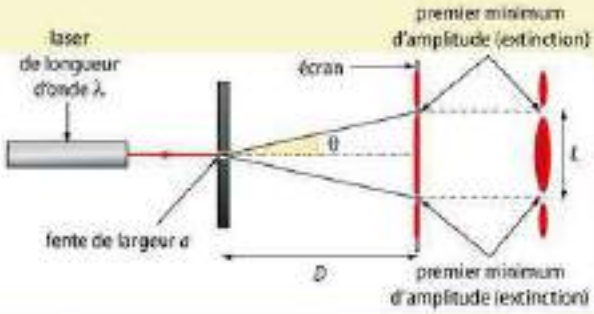


L'atténuation par absorption dépend du milieu de propagation ou du milieu absorbant, et aussi de la fréquence.

2 Diffraction d'une onde

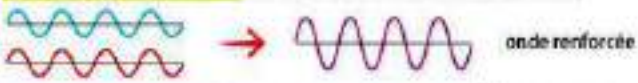
angle caractéristique de diffraction (rad) → $\theta = \frac{\lambda}{a}$ ← longueur d'onde (m)
← taille de l'ouverture (m)

En optique la **diffraction** vient limiter le pouvoir séparateur de la lunette astronomique.



3 Interférences de deux ondes

Interférences constructives : les ondes sont décalées de $k \cdot \lambda$ (k entier)



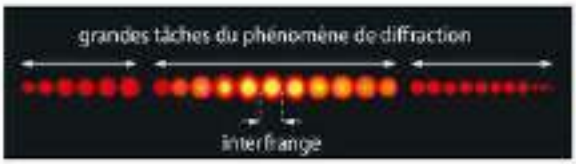
onde renforcée

Interférences destructives : les ondes sont décalées de $(k \frac{1}{2}) \cdot \lambda$ (k entier)



onde annulée

distance entre les deux sources (m)
abscisse de l'écran où se superposent les deux ondes (m)
différence de marche (m) → $\delta = \frac{e \cdot x}{D}$ ← distance fentes écran (m)



longueur d'onde (m)
interfrange (m) → $i = \frac{\lambda \cdot D}{e}$ ← distance fentes écran (m)
distance entre les deux sources (m)

4 Effet Doppler

vitesse de l'émetteur par rapport à l'observateur ($m \cdot s^{-1}$)
décalage Doppler (Hz) → $\Delta f = f_R - f_e = \frac{f_e \cdot v}{c}$ ← vitesse de l'onde ($m \cdot s^{-1}$)
fréquence de l'onde perçue par l'observateur (Hz)
fréquence de l'onde émise par émetteur au repos (Hz)



Vérifier l'essentiel

EN AUTONOMIE

Pour chaque question, choisir la ou les bonnes réponses. ➥ SOLUTIONS EN PAGE 593

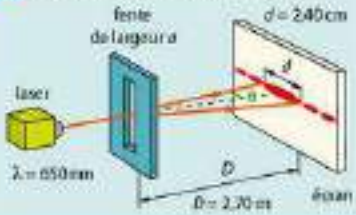
Flash PAGE corrigés détaillés

Flash PAGE QCM interactifs

1 Niveau d'intensité sonore

	A	B	C
1 Le niveau d'intensité sonore correspondant à une intensité $I = 5{,}9 \times 10^{-7}\ W \cdot m^{-2}$ vaut :	59 dB	132 dB	58 dB
2 L'intensité sonore associée au niveau d'intensité sonore 104 dB est :	$2{,}5 \times 10^{-2}\ W \cdot m^{-2}$	$2{,}5 \times 10^{10}\ W \cdot m^{-2}$	$10^{-12} \times 10^{\frac{104}{10}}\ W \cdot m^{-2}$

2 Diffraction d'une onde

	A	B	C
3 Identifier les photographies où le phénomène de diffraction se manifeste.			
4 La fente a une largeur de : 	$a = 1{,}46 \times 10^{-6}$ m	$a = 146\ \mu m$	$a = 2{,}88 \times 10^{-3}$ m

3 Interférences de deux ondes

	A	B	C
5 Dans cette situation, la somme des deux ondes donne : 	une zone sombre.	une zone éclairée.	une zone peu éclairée.
6 La longueur d'onde vaut : 	2,25 mm	2,0 mm	2,75 mm

4 Effet Doppler

	A	B	C
7 Un émetteur ultrasonore de fréquence $f = 40{,}0$ kHz, s'éloigne à la vitesse de $20{,}0\ m \cdot s^{-1}$. La célérité du son vaut $340\ m \cdot s^{-1}$. La fréquence perçue vaut :	2,47 kHz	42,4 kHz	37,6 kHz

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Acquérir les bases

1 Niveau d'intensité sonore

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Utiliser la fonction mathématique logarithme décimal et sa fonction réciproque.
- Exploiter l'expression $L = 10 \log \frac{I}{I_0}$ ou $I = I_0 \cdot 10^{\frac{L}{10}}$

➡ Acquérir les bases : 8 ➡ S'entraîner : 28

- Connaître l'atténuation géométrique et l'atténuation par absorption

➡ Acquérir les bases : 11

DONNÉES

- seuil d'audibilité à 1 000 Hz : $I_0 = 1{,}0 \times 10^{-12}$ W · m^{-2}.
- célérité du son : c_{air} 340 m · s^{-1} ; $c_{lumière} = 3{,}0 \times 10^8$ m · s^{-1}.

8 Plus on est nombreux...

1. a. Un groupe de musiciens joue de la guitare : le niveau d'intensité sonore est de 75 dB. Avec quel appareil doit-on effectuer cette mesure ?

b. Sachant qu'une guitare a un niveau sonore de 65 dB, combien y a-t-il de guitares identiques dans ce groupe ?

2. Un percussionniste les accompagne et frappe un triangle, de niveau sonore 50 dB. Quelle est l'intensité sonore totale ? Commenter.

9 Performance d'un appareil ménager



Pour l'achat d'un lave-vaisselle, le niveau sonore est toujours indiqué par le fabricant.

1. Comparer les intensités sonores de ces deux appareils.

2. La différence de niveau d'intensité sonore mérite-t-elle une attention particulière lors de l'achat ?

10 Santé au travail

D'après le Code du travail, les ouvriers d'une entreprise ne doivent pas être soumis à des niveaux d'intensités sonores supérieures à 87 dB. Un ouvrier travaille sur une machine de niveau sonore 83 dB. Il est entouré de deux machines voisines émettant un niveau sonore d'intensité 82 dB chacune.

1. Calculer les intensités sonores associées aux machines.

2. a. Sachant que les intensités sonores s'ajoutent, calculer le niveau d'intensité sonore total reçu par l'ouvrier.

b. L'entreprise satisfait-elle au Code du travail ?

11 Feux d'artifice



« Mais quel est l'intérêt de baisser le niveau sonore de ces spectacles pyrotechniques ? La raison est à chercher dans le bien-être animal [...]. L'explosion de ces mêmes pétards constitue un véritable calvaire pour beaucoup d'animaux de compagnie. Plus sensibles que nous aux détonations, certains chiens ne savent où se réfugier pour échapper au supplice qui peut provoquer, dans les cas extrêmes, la mort de certains animaux. [...] En chiffres, un feu d'artifice classique cela représente entre 120 et 160 dB, la version à bruits contenus bride les décibels à 60, soit le volume produit par votre radio à volume normal. L'inconvénient est qu'un feu d'artifice à bruits contenus ne s'élève qu'à 75 mètres, il est donc moins spectaculaire qu'un feu d'artifice classique qui atteint lui les 200 mètres d'altitude. »

RTBF.be, Vincent Clérin, le 18 juillet 2019

1. En vous référant à l'échelle des niveaux d'intensité sonore du cours (FIG. 1), comment se situent les niveaux d'intensité sonore cités dans cet article ?

2. Dans le cas d'un feu d'artifice classique, quels conseils donneriez-vous à des propriétaires d'animaux pour atténuer le niveau d'intensité sonore perçu ?

2 Diffraction d'une onde

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

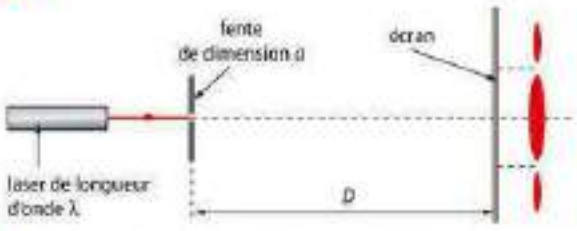
- Caractériser le phénomène de diffraction dans des situations variées et en citer des conséquences concrètes.
- Schématiser le phénomène de diffraction.

➡ Acquérir les bases : 10 ➡ S'entraîner : 25

- Exploiter la relation exprimant l'angle caractéristique de diffraction en fonction de la longueur d'onde et de la taille de l'ouverture.

➡ Acquérir les bases : 10 ➡ S'entraîner : 29

12 Expérience de la diffraction d'ondes lumineuses



1. Reproduire le schéma ci-dessus et indiquer la position des premières extinctions, la largeur L de la tâche centrale de diffraction et l'angle caractéristique de diffraction θ.

2. a. Rappeler l'expression de l'angle caractéristique de diffraction, en précisant la signification et l'unité des grandeurs.

b. En se plaçant dans l'approximation des petits angles, où $\tan\theta \approx \theta$, établir la relation liant θ, a, λ, L et D.

13 Diffraction par un trou éclairé par un laser vert

Un trou d'ouverture $a = 200\ \mu m$ est éclairé par le faisceau d'un laser vert de longueur d'onde λ (comme sur le montage de l'exercice 12, avec la distance $D = 1{,}7$ m).

1. Qu'observerait-on sur l'écran si la lumière se propageait rectilignement ?

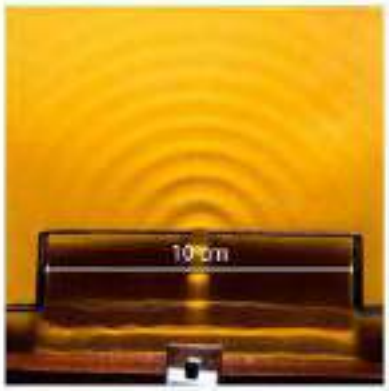


2. En fait, on observe une figure de diffraction comme celle-ci (à taille réelle).

a. En se plaçant dans l'approximation des petits angles, où $\tan\theta = \theta$, établir la relation liant θ, a, λ, L et D.

b. En mesurant directement sur la photo le diamètre de la tâche centrale, déterminer la longueur d'onde λ du laser vert.

14 Diffraction des ondes à la surface de l'eau

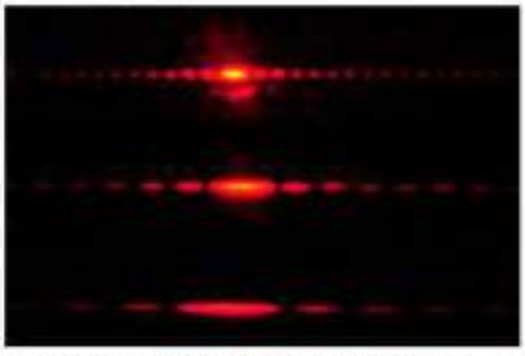


Un élève règle une cuve à ondes de manière à observer le phénomène de diffraction avec les ondes mécaniques à la surface de l'eau.

1. Déterminer la longueur d'onde des ondes avant l'ouverture et après l'ouverture. Conclure.

2. Calculer l'angle caractéristique de la diffraction θ_d et le mettre en évidence sur la photo.

15 Lot de fentes verticales



Le faisceau d'un laser hélium-néon de longueur d'onde $\lambda = 633$ nm éclaire trois fentes verticales différentes, la distance fente écran est de 3,2 m. Les figures de diffraction sont à l'échelle ½.

1. a. Comment est orientée la figure de diffraction pour une fente verticale ?

b. Quelle est la fente la plus fine ?

2. a. Déterminer l'ouverture de cette fente.

b. Quelle serait la taille de la tâche centrale si la fente était éclairée par un laser bleu de longueur d'onde $\lambda = 405$ nm ?

3 Interférences de deux ondes

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Caractériser le phénomène d'interférences de deux ondes et en citer des conséquences concrètes. Le schématiser
- Établir les conditions d'interférences constructives et destructives de deux ondes issues de deux sources ponctuelles en phase dans le cas d'un milieu de propagation homogène.

→ Acquérir les bases : 16 → S'entraîner : 29

- Prévoir les lieux d'interférences constructives et les lieux d'interférences destructives dans le cas des trous d'Young, l'expression linéarisée de la différence de chemin optique étant donnée.
- Établir et exploiter l'expression de l'interfrange.

→ Acquérir les bases : 18 → S'entraîner : 27

16 Interférences sonores

Deux haut-parleurs sont alimentés par un même générateur qui émet une onde sonore de longueur d'onde 2,0 m.

1. a. Un point situé à 1 m du premier haut-parleur et à 4 m du deuxième correspond-il à un maximum ou un minimum d'amplitude ?

b. Comment qualifier les interférences en ce point ?

2. Même question pour un point situé à 6 m de l'un et 14 m de l'autre.

17 Superposition d'ondes

Deux ondes planes à la surface de l'eau ont la même longueur d'onde et sont issues de la même source.

1. Comment qualifie-t-on ces deux ondes ?

2. Voici trois situations où les ondes A et B se superposent, vue de profil :

A deux ondes en opposition de phase



B deux ondes en phase



C deux ondes avec un décalage quelconque



Dans chaque cas, attribuer à chaque situation la (ou les) expression(s) qui lui convient : *Interférences constructives - Interférences destructives - ondes en phase - onde en opposition de phase - zone sombre - zone peu éclairée - zone éclairée*

3. Qu'entendrait-on dans chacune des trois situations si les ondes étaient sonores ?

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

18 Différence de chemin optique



Un laser rouge, de longueur d'onde $\lambda = 633$ nm, éclaire deux petits trous espacés d'un écartement e. On se place au point M.

1. a. Définir la différence de chemin optique δ. Reproduire le schéma et la représenter dessus.
b. Le point O, au centre de l'écran, est-il sur une frange sombre ou brillante ?

2. On établit que la différence de chemin optique s'écrit : $\delta = \frac{e \times x}{D}$, x étant l'abscisse du point M. Rappeler à quelle condition on observe le premier maximum d'amplitude, autre que pour $x = 0$.

3. Ce premier maximum d'amplitude définit la valeur de l'interfrange i, on a alors : $x = i$. Exprimer littéralement l'interfrange i en fonction de λ, e et D.

4. En déduire l'écartement e entre les deux trous pour un interfrange de 3,4 mm mesuré sur l'écran.

4 Effet Doppler

EN AUTONOMIE

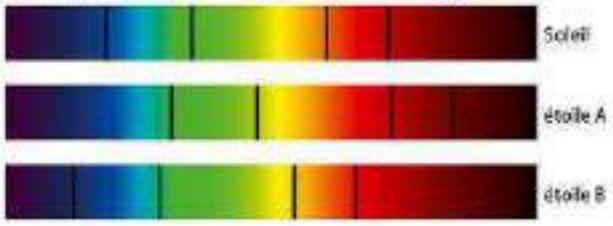
Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Décrire et interpréter qualitativement les observations correspondant à une manifestation de l'effet Doppler.
- Établir l'expression du décalage Doppler.
- Exploiter l'expression du décalage Doppler dans des situations variées.

→ Acquérir les bases : 19 → S'entraîner : 21

19 Effet Doppler en astrophysique

Le spectre d'absorption ci-dessous présente les positions des raies d'absorption d'un élément chimique sur le spectre du Soleil et sur celui de deux étoiles A et B. Selon l'effet Doppler, plus une étoile s'éloigne de la Terre et plus son spectre d'absorption se décale vers les grandes longueurs d'ondes.



1. Quelle étoile s'éloigne de la Terre ? se rapproche ?

2. Quelle étoile a la vitesse la plus élevée dans la direction d'observation ?

20 Le bourdon

Le bourdon ne se sert pas uniquement de ses ailes pour voler : elles servent aussi à ventiler son nid pour le refroidir. Il peut actionner ses ailes jusqu'à 200 battements par seconde.



1. Si l'insecte se rapproche d'un observateur à la vitesse de 7 m · s^{-1}, quelle sera la fréquence du son perçue par un observateur immobile ?

2. Si un autre bourdon vole à la même vitesse à côté de lui, quelle fréquence perçoit-il ?

Faire le point avant d'aller plus loin

PRÉPA BAC

Pour vérifier ses connaissances, répondre aux questions suivantes (sans regarder le cours !)

- Écrire la relation qui lie le niveau d'intensité sonore et l'intensité sonore.
- Illustrer l'atténuation géométrique et l'atténuation par absorption.
- Citer le phénomène de diffraction d'une onde dans des situations variées.
- Écrire la relation entre l'angle caractéristique de la diffraction et la longueur d'onde.
- Citer le phénomène d'interférences dans des situations variées et les conséquences concrètes qui en découlent.
- Écrire les conditions d'interférences constructives/destructives de deux ondes ponctuelles en phase.
- Établir l'expression de l'interfrange et savoir l'exploiter.
- Citer les observations correspondant à l'effet Doppler.
- Établir et exploiter l'expression du décalage Doppler.

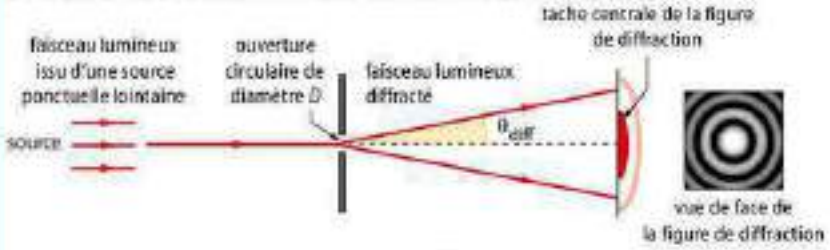
Retrouver ces questions en version numérique Flash PAGE cartes mémo

Exercice résolu EN AUTONOMIE

21 Diffraction et astronomie

La première planète extrasolaire, dont on a pu faire une image par observation directe dans le proche infrarouge, s'appelle 2M1207b. Elle orbite à une distance estimée à 55 unités astronomiques (ua) autour de l'étoile 2M1207a, située à 230 années lumières (al) de la Terre.

Actuellement, l'observation de détails avec un télescope terrestre est principalement limitée par le phénomène de diffraction lié à la valeur de l'ouverture circulaire D du télescope. Dans le cas d'une ouverture circulaire, on admet que l'angle caractéristique de diffraction θ_{diff} (exprimé en radian) vérifie la relation $\theta_{diff} = 1{,}22\dfrac{\lambda}{D}$, où λ est la longueur d'onde du faisceau incident et D le diamètre de l'ouverture.



Données : *unité astronomique : 1 ua = 1,496 × 10¹¹ m ; année-lumière : 1 al = 9,461 × 10¹⁵ m ; intervalle de longueur d'onde du proche infrarouge [700 nm ; 1 000 nm].*

1. **Citer** une propriété de la lumière qui explique le phénomène de diffraction.
2. **Représenter** par un schéma, sans souci d'échelle, l'angle α sous lequel on voit le couple étoile-planète depuis la Terre. Calculer cet angle.
3. Un télescope permet de distinguer deux objets à condition que l'écart angulaire α entre ces deux objets soit supérieur ou égal à l'angle caractéristique de diffraction.

En 2024 Extra Large Telescope aura un de diamètre 39 m. **Estimer** s'il permettra d'observer l'exoplanète sans être gêné par le phénomène de diffraction.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- Les distances sont à convertir en mètres.
- Toutes les données sont nécessaires pour déterminer les caractéristiques du phénomène de diffraction.

LES VERBES D'ACTION

- **Citer** : indiquer une justification à une observation ou une affirmation.
- **Représenter** : rendre une situation perceptible par une figure.
- **Estimer** : calculer approximativement une distance, un angle...

QUELQUES CONSEILS

1. Se baser sur le titre du chapitre.
2. et 3. Il faut convertir les distances en mètres.
2. Les données sont exprimées avec 4 chiffres significatifs donc le résultat aussi.
3. Utiliser l'expression de l'angle de diffraction fournie.

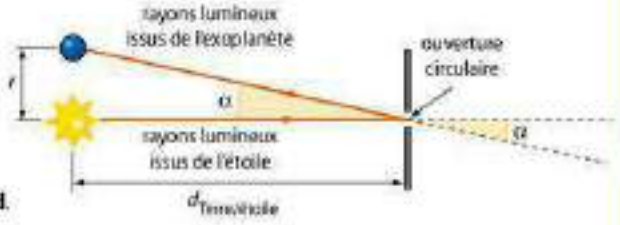
EXEMPLE DE RÉDACTION

1. a. Le phénomène de diffraction montre le **caractère ondulatoire** de la lumière.

2. Le schéma de l'angle sous lequel on voit le couple planète-étoile est le suivant.

$$\tan\alpha \approx \alpha = \frac{\text{côté opposé}}{\text{côté adjacent}} = \frac{r}{d_{\text{Terre-étoile}}}$$

$$\text{AN : } \alpha = \frac{55 \times 1{,}496 \cdot 10^{11}}{230 \times 9{,}461 \cdot 10^{15}} = \mathbf{3{,}781 \cdot 10^{-6}\ rad.}$$



3. Calculons l'angle caractéristique de diffraction :

$$\theta_{diff} = 1{,}22\frac{\lambda}{D}. \text{ AN : } \theta_{diff} = 1{,}22 \times \frac{700 \cdot 10^{-9}}{39} = \mathbf{2{,}2 \cdot 10^{-8}\ rad.}$$

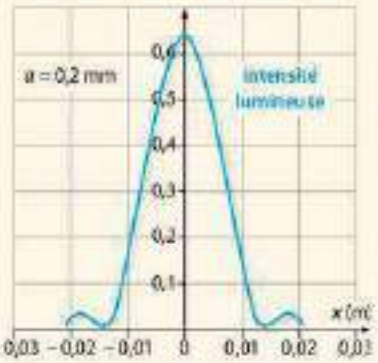
Le phénomène de diffraction ne gêne pas la séparation de l'étoile et de son exoplanète car $\alpha > \theta_{diff}$.

EXERCICE SIMILAIRE

22 Diffraction dans un télescope

Lorsqu'on observe une étoile à travers un télescope, l'image apparaît sous la forme d'une tache, dont la dimension est liée aux défauts de l'instrument, tels que la diffraction par l'ouverture limitée. On réalise le montage de diffraction dans lequel un laser correspond à l'étoile et le miroir du télescope est modélisé par une ouverture circulaire de diamètre a produisant un phénomène de diffraction.

1. Décrire le phénomène de diffraction.
2. Quel caractère de la lumière est mis en évidence ici ?
3. À partir des résultats expérimentaux, déterminer la valeur du diamètre d_{Airy} de la tache centrale de diffraction observée pour cette ouverture.



Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Exercice résolu EN AUTONOMIE

23 L'effet Doppler et la musique

Lors de la répétition générale d'un ballet, une pianiste ponctue la fin du 1er acte en jouant une série de La_3 successifs au cours desquels un danseur, effectue un saut appelé « grand jeté » dans sa direction : il fait un bond jambes tendues de 1,9 m en 0,75 s. Après le baisser du rideau, le directeur artistique trouve le danseur et la pianiste en pleine discussion. Il a perçu des La_3 successifs qui lui semblaient de hauteurs différentes et pense qu'elle n'a pas joué la même note. Elle conteste et affirme qu'elle a bien joué la même note.

Le seuil de variation de fréquence que l'oreille humaine est capable de percevoir est appelée *seuil différentiel relatif*, S_{dr}. La variation de fréquence perçue est décelable si la variation relative des fréquences entre ces deux sons, notée $\frac{\Delta f}{f}$, est supérieure ou égale à ce seuil S_{dr}. Pour une oreille entraînée, par exemple par plusieurs années d'études musicales, il vaut environ 1/1 000 quelle que soit la fréquence du son.

Données : *célérité du son dans l'air 340 m · s⁻¹.*

	Sol_3	La_3	Si_3
Fréquence (Hz)	392	440	494

1. **Déterminer** la vitesse moyenne du danseur au cours de son « grand jeté ».

2. a. En utilisant le décalage Doppler, **calculer** la fréquence perçue par le danseur en mouvement. Expliquer en détail votre raisonnement et votre calcul.

b. Sachant que le danseur a une oreille entraînée par des années d'études musicales, **justifier** l'origine du désaccord entre la pianiste et le danseur.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- On donne la distance et la durée du saut, utile pour calculer la vitesse.
- Bien exploiter les informations, elles sont utiles à la résolution.

LES VERBES D'ACTION

- **Déterminer** : mettre en œuvre une stratégie pour trouver un résultat.
- **Calculer** : Effectuer un calcul numérique.
- **Justifier** : établir le bien-fondé de l'argumentation.

QUELQUES CONSEILS

1. Il faut conserver le résultat exact du calcul de la calculatrice pour s'en resservir dans le calcul suivant :
On se limitera à 2 chiffres significatifs en raison des données.

2. a. Exploiter la relation du décalage Doppler. Ne garder qu'un chiffre significatif. Mais le réutiliser pour le prochain calcul.

3. Comparer $\frac{\Delta f}{f}$ et le seuil $S_{dr} = \frac{1}{1\,000} = 1 \times 10^{-3}$

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. On applique la définition de la vitesse $v = \frac{d}{\Delta t}$.
AN : $v = \frac{1,9}{0,75} = 2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. La vitesse du danseur vaut donc **2,5 m · s⁻¹**.

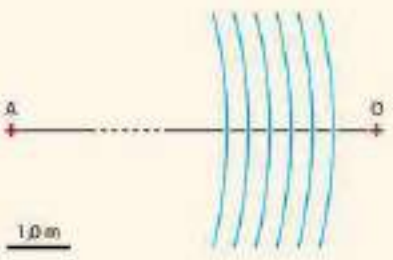
2. a. Le décalage Doppler s'écrit : $\Delta f = f \cdot \frac{v}{c_{son}}$, AN : $\Delta f = 440 \times \frac{2,5}{340} = 3,3$ Hz.
Comme il s'approche de la pianiste, la fréquence perçue est plus grande : donc $f_R = f + \Delta f$. Soit f_R = **443 Hz**.

b. On calcule $\frac{\Delta f}{f} = \frac{3,3}{440} = 7,5 \cdot 10^{-3}$. Étant donné que cette variation relative de fréquence est supérieure au seuil S_{dr} qui vaut $\frac{1}{1\,000}$. Le danseur ayant une oreille entrainée va percevoir cette variation de fréquence d'où le désaccord avec la pianiste immobile qui perçoit bien le La_3 à 440 Hz.

EXERCICE SIMILAIRE

24 Vitesse d'un hélicoptère

On s'intéresse à un son émis par un hélicoptère et perçu par un observateur immobile. La valeur de la fréquence de l'onde sonore émise par l'hélicoptère est $f_0 = 8,10 \times 10^2$ Hz. Les portions de cercles de la figure ci-contre donnent les maxima d'amplitude de l'onde sonore à un instant donné. Le point A schématise l'hélicoptère. L'hélicoptère se déplace à vitesse constante le long de l'axe et vers l'observateur placé au point O. La célérité du son vaut $c_{son} = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



1. Déterminer la longueur d'onde λ perçue par l'observateur lorsque l'hélicoptère est en mouvement rectiligne uniforme. En déduire la fréquence perçue par l'observateur.

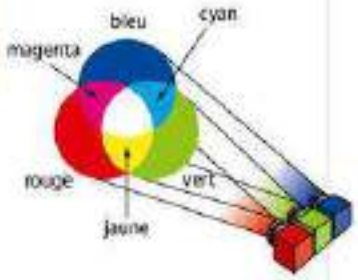
2. Estimer la valeur de la vitesse de l'hélicoptère en utilisant l'expression du décalage Doppler.

S'entraîner pour maîtriser

SAVOIR RÉDIGER

DONNÉES

- Seuil d'audibilité à 1 000 Hz : $I_0 = 1{,}0 \times 10^{-12}\ W \cdot m^{-2}$; célérité du son : $340\ m \cdot s^{-1}$.



25 Proposer une correction de la solution proposée à l'énoncé.

Énoncé

Une source de lumière blanche éclaire une fente de largeur $a = 200\ \mu m$. La figure de diffraction est observée sur un écran placé à une distance $D = 220$ cm. Chaque radiation monochromatique composant la lumière blanche crée sa propre figure de diffraction.

1. Exprimer la relation liant la longueur d'onde λ, l'ouverture de la fente a, la distance fente-écran D et la largeur L de la tâche centrale de diffraction.

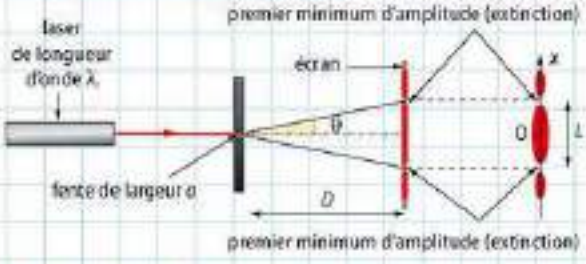
2. Calculer les largeurs des tâches centrales de diffraction des trois couleurs primaires, c'est-à-dire bleu (405 nm), le vert (525 nm) et le rouge (650 nm).

3. Lors de la superposition de lumières colorées, une synthèse additive est réalisée, de quelle couleur est :
a. le point central de la figure de diffraction, d'abscisse $x = 0$ mm ?
b. le point d'abscisse $x = 4{,}5$ mm ?
c. le point d'abscisse $x = 7$ mm ?

4. En déduire l'aspect de la figure de diffraction en lumière blanche.

Solution proposée par un élève

J'utilise le schéma suivant vu en cours.



1. Je sais que l'angle caractéristique de diffraction s'écrit : $\theta = \frac{\lambda}{a}$. ⟩ Éviter "je sais que".
Je sais aussi que pour les petits angles : $\theta = \tan\theta = \frac{L}{2D}$
Alors $\frac{\lambda}{a} = \frac{L}{2D}$

2. Je remplace par les valeurs de l'énoncé :
$\frac{405}{200} = \frac{L}{2 \times 220 \cdot 10^{-2}}$ et j'isole L dans l'expression ci-dessus :
pour le bleu : $L_B = \frac{2 \times 405 \times 220 \cdot 10^{-2}}{200 \cdot 10^{-9}} = 0{,}90\ cm = 9{,}0\ mm$
Il est préférable de raisonner en formule littérale. Convertir les distances en m !

pour le vert, il faut changer la longueur d'onde :
$L_V = \frac{2 \times 525 \times 220 \cdot 10^{-2}}{200 \cdot 10^{-9}} = 1{,}2\ cm = 12\ mm$

Idem pour le rouge :
$L_R = \frac{2 \times 650 \times 220 \cdot 10^{-2}}{200 \cdot 10^{-9}} = 1{,}4\ cm = 14\ mm$

3. a. Le point central de la figure de diffraction est toujours blanc. ⟩ **Il faut expliquer et non affirmer.**

b. On remarque que 4,5 mm est la moitié de la tache centrale due à la couleur bleue, ça correspond au premier minimum d'extinction du bleu. Comme ne se superposent que le vert et le rouge, par synthèse soustractive, la couleur résultante est jaune.

c. De même, $x = 7$ mm correspond à l'extinction du rouge, il ne reste que le bleu et le vert, ce qui donne la couleur magenta. **Revoir la synthèse additive des couleurs.**

4. La figure de diffraction va donc être la superposition des couleurs des figures de diffraction de chaque couleur.

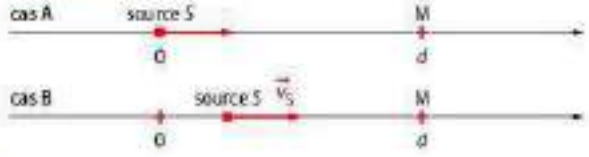
26 Expérience de Buys-Ballot HISTOIRE DES SCIENCES



Christian Doppler, savant autrichien, propose en 1842 une explication de la modification de la fréquence du son perçue par un observateur immobile lorsque la source sonore est en mouvement. Buys-Ballot, scientifique hollandais, vérifie expérimentalement la théorie de Doppler en 1845, en enregistrant le décalage en fréquence d'un son provenant d'un train en mouvement et perçu par un observateur immobile.

Le référentiel d'étude est le référentiel terrestre dans lequel le détecteur, noté M, est immobile sur le quai. Les musiciens, présents à bord du train, jouent la note *la*, de fréquence $f_0 = 440$ Hz. Ils sont assimilés à une source sonore S. Le signal sonore se propage à la célérité c_{son} par rapport au référentiel terrestre.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique



1. *1er cas* : la source S est immobile en $x = 0$ et le détecteur M, situé à la distance d, perçoit chaque bip sonore avec un retard lié à la durée de propagation du signal.

a. Définir le retard τ.

b. Comparer la période temporelle T de la note perçue par le détecteur à la période d'émission T_0.

2. *2e cas* : la source S, initialement en $x = 0$, se déplace à une vitesse constante v suivant l'axe (Ox) en direction du détecteur immobile. La vitesse v est inférieure à la célérité c_{son}. On suppose que la source reste à gauche du détecteur.
Le détecteur perçoit alors la note de période :

$$T' = T_0 \times \left(1 - \frac{v}{c_{son}}\right).$$

a. Indiquer si la fréquence f' de la note est inférieure ou supérieure à la fréquence f_0.

b. Calculer la fréquence f' si le train se déplace à 120 km · h^{-1}.

27 Les talents s'additionnent



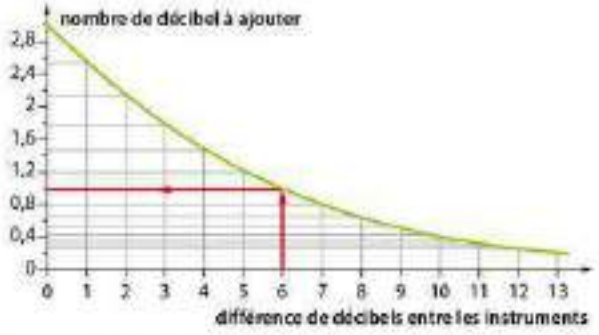
Dans un groupe de musique, on mesure avec un sonomètre les niveaux d'intensité sonore de chaque instrument séparément. Pour la batterie, il indique 70 dB, pour la guitare 68 dB, pour le piano 65 dB et 66 dB pour la chanteuse. Quel est le niveau d'intensité sonore total, lorsque tous les instruments jouent ensemble ?

JE VÉRIFIE QUE J'AI...

- calculé les intensités sonores de chaque instrument.
- additionné uniquement les intensités sonores.

28 Additionner sans calculatrice

Le graphique ci-après permet de connaître le niveau d'intensité sonore résultant de plusieurs sources différentes sans avoir recours à des calculs d'intensité sonore.
Par exemple, deux guitares, ayant respectivement 80 dB et 86 dB de niveaux d'intensité sonore, auront un niveau d'intensité sonore totale de 87 dB.

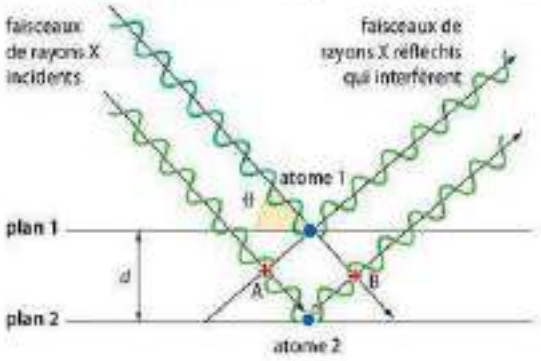


1. Quelle fonction mathématique modélise le niveau d'intensité sonore ? Justifier pourquoi les niveaux sonores ne s'ajoutent pas.

2. En vous servant de ce graphique, déterminer le niveau d'intensité sonore
a. lorsqu'un percussionniste a un niveau sonore de 87 dB et qu'une guitare électrique en a un de 91 dB ;
b. lorsque deux flûtistes jouent ensemble avec le même niveau sonore 82 dB.

29 Interférences et rayons X DÉMARCHES DIFFÉRENCIÉES

Les rayons X sont utilisés pour explorer la matière, par exemple pour évaluer la distance d entre deux plans 1 et 2 voisins d'atomes dans un cristal. Lorsqu'on envoie un faisceau de rayons X de longueur d'onde λ sur un cristal, ils sont réfléchis par les atomes qui constituent le cristal. Les ondes réfléchies par les atomes interfèrent. On peut représenter de façon très simplifiée cette situation par le schéma suivant :



***Données** : la différence de chemin optique entre deux ondes incidentes qui se réfléchissent sur deux plans successifs est donnée par la relation : $\delta = 2\,d \cdot \sin\theta$, où d est la distance entre deux atomes voisins et θ l'angle entre le rayon et le plan ; $\theta = 11{,}5°$ et $\lambda = 145$ pm.*

DÉMARCHE EXPERTE

Comment la diffraction par rayons X permet d'étudier la structure des plans cristallins, notamment la distance entre les deux plans 1 et 2 ?

DÉMARCHE AVANCÉE

1. a. En exploitant le schéma précédent, évaluer la différence de chemin optique.

2. Préciser à quelles conditions les rayons X, qui interfèrent après réflexion, donnent des interférences destructives ou constructives.

3. Déterminer la valeur de d dans le cristal dans le cas où l'on obtient des interférences constructives pour une différence de chemin optique minimale.

30 Fire truck siren

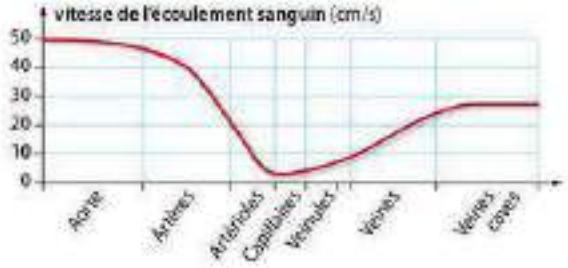
The siren of a fire truck emits sound at a frequency of 800 Hz. You are standing on the pavement. If the fire truck drives past you at a speed of 30 m · s^{-1}, what frequency will you hear when :

1. the fire truck is approaching you ;

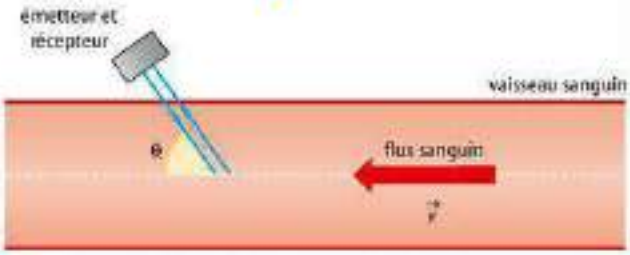
2. the fire truck is driving away from you ;
Take the speed of sound in air to be 340 m · s^{-1}.

31 Écho Doppler

La médecine fait appel à l'effet Doppler pour mesurer la vitesse d'écoulement du sang dans les vaisseaux sanguins (figure A ci-dessous).



Un émetteur produit des ondes ultrasonores de fréquence $f_E = 10$ MHz qui traversent la paroi d'un vaisseau sanguin. Pour simplifier, on suppose que lorsque le faisceau ultrasonore rencontre des cibles mobiles, comme les globules rouges du sang animés d'une vitesse v, sur lesquelles il se réfléchit avec une modification de la fréquence ultrasonore par effet Doppler (figure B ci-dessous).



La vitesse v des globules rouges dans le vaisseau sanguin est donnée par la relation :

$v = \dfrac{v_{ultrason} \cdot \Delta f}{2 \cdot \cos\theta \cdot f_E}$ où Δf est le décalage Doppler en fréquence entre l'onde émise et l'onde réfléchie, $v_{ultrason}$ la célérité des ultrasons dans le sang et θ l'angle défini sur la figure B.

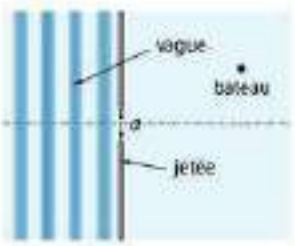
On donne $v_{ultrason} = 1{,}57 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ et $\theta = 45°$.

1. a. Le décalage en fréquence mesuré par le récepteur étant de 1,5 kHz, en déduire la vitesse v des globules rouges.
b. Identifier le(s) type(s) de vaisseaux sanguins dont il pourrait s'agir.

2. Pour les mêmes vaisseaux sanguins et dans les mêmes conditions de mesure, on augmente la fréquence des ultrasons émis f_E. Indiquer comment évolue le décalage en fréquence Δf. Justifier.

32 À l'abri ?

La houle prend naissance sous l'effet du vent loin des côtes. Des vagues sont espacées de 15,7 m. Cette houle arrive sur un port dont l'ouverture entre deux jetées a une largeur $a = 36{,}0$ m. Un bateau est stationné au fond du port comme indiqué sur le schéma ci-contre.



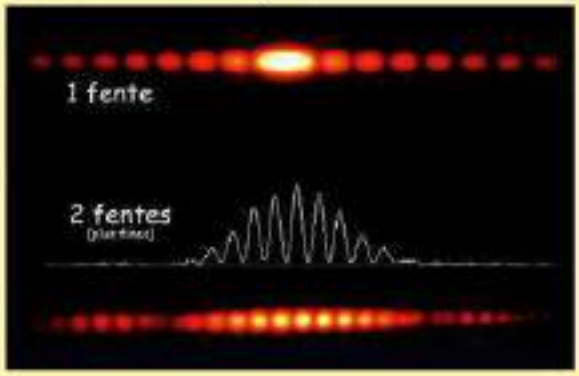
1. Calculer l'angle caractéristique de diffraction en degré.

2. En déduire si le bateau risque de ressentir les effets de la houle. Justifier en exploitant le schéma et en utilisant un rapporteur.

À L'ORAL

33 Faisons le point

On considère les deux figures obtenues ainsi que l'acquisition expérimentale ci-dessous.
Élaborer un exposé oral de quelques minutes présentant :
- le protocole expérimental qui a pu être mis en œuvre pour les obtenir ; vous insisterez sur les différences entre les deux montages.
- l'acquisition qui a été faite ;
- l'explication des deux phénomènes observés ;
- la relation de l'angle caractéristique de diffraction ;
- la relation de l'interfrange.



Les mots-clés à utiliser
- diffraction par une ouverture
- interférences de deux ondes lumineuses
- interférences destructives
- interférences constructives
- différence de chemin optique

34 RETOUR SUR LA PAGE D'OUVERTURE

Les casques avec réduction de bruit ont pris une place de plus en plus grande dans notre environnement. Comment expliquer le phénomène qui se produit lorsqu'on active ce système ?



Préparer un exposé oral qui explique :
- le phénomène qu'utilise le fabricant du casque pour annihiler les bruits extérieurs ;
- quelles sont les différentes techniques pour atténuer au maximum le fond sonore et ainsi profiter pleinement de sa musique préférée.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Développer ses compétences

35 Interférences au service de l'astrophysique

RÉSOLUTION DE PROBLÈME

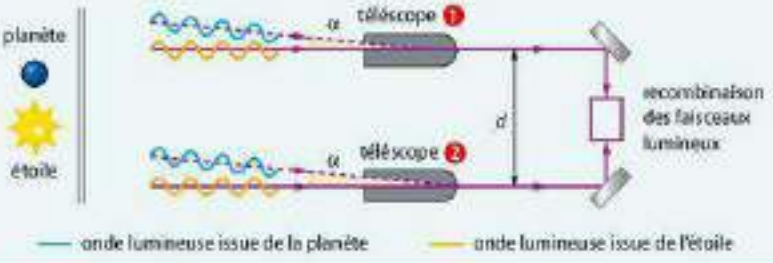
1h

C.SH Présenter une démarche de manière argumentée, synthétique et cohérente

En général, les exoplanètes sont peu lumineuses par rapport aux étoiles ce qui ajoute une difficulté supplémentaire pour les observer. Un dispositif interférométrique, décrit dans le document 1, a été proposé en 1978 par le physicien australien Ronald N. Bracewell. L'objectif est d'éliminer le signal de l'étoile tout en permettant l'enregistrement du signal émis par l'exoplanète.

DOC 1 Dispositif interférométrique

On considère deux télescopes identiques dont les lignes de visée sont dirigées vers une étoile lointaine. La direction d'une exoplanète à proximité de l'étoile fait un angle α avec la ligne de visée. Dans ce dispositif, les faisceaux issus des deux télescopes sont recombinés grâce à un dispositif optique situé à égale distance des deux télescopes.



DONNÉES

- On fait l'étude du rayonnement infrarouge, plus particulièrement à la longueur d'onde $\lambda = 10{,}0\ \mu m$.
- Distance Terre étoile : $d_{Terre\text{-}étoile} = 2{,}18 \times 10^{18}$ m.
- Distance Exoplanète étoile : $r = 8{,}23 \times 10^{12}$ m.

DOC 2 Recombinaison des signaux issus de l'étoile

On appelle T la période de l'onde lumineuse. L'idée de Bracewell est d'ajouter, juste après le télescope 2, un système optique permettant d'ajouter un retard d'une demi-période $\frac{T}{2}$ sur le signal provenant de ce télescope.

DOC 3 Recombinaison des signaux issus de l'exoplanète

Les rayons lumineux issus de l'exoplanète arrivent sur les dispositifs interférométriques en faisant un angle α avec la ligne de visée. À cause de cette inclinaison, le signal lumineux arrive sur le télescope 2 avec un retard $\tau = \frac{d \cdot \sin\alpha}{c}$ où d est la distance entre les deux miroirs.

DOC 4 Schéma de l'écart angulaire

α est l'écart angulaire entre l'étoile et la planète, c'est-à-dire l'angle sous lequel l'écart angulaire étoile-planète est vu depuis la Terre. Il se calcule grâce à la relation :

$$\alpha \approx \sin\alpha \approx \tan\alpha = \frac{r}{d_{Terre\text{-}étoile}}$$



QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Justifier que, dans le dispositif décrit dans le document 1, les rayons lumineux issus de l'étoile et captés par les télescopes interfèrent de manière constructive au niveau de la recombinaison.
2. Montrer que le système optique de Bracewell (doc. 2) élimine l'onde lumineuse issue de l'étoile.
3. Montrer que le signal issu du télescope 2 a un retard de $\tau = \frac{d \cdot \sin\alpha}{c} + \frac{T}{2}$ par rapport au signal issu du premier télescope.

PROBLÉMATIQUE

Prévoir la distance minimale d entre les deux télescopes pour obtenir une interférence constructive lors de l'observation de l'exoplanète en rotation autour de l'étoile.

Il est attendu une prise d'initiatives et une présentation de la démarche suivie même s'il elle n'a pas abouti.

36 Effet Doppler au service de l'astrophysique

TÂCHE COMPLEXE

1 h

ANALYSER Proposer une stratégie de résolution

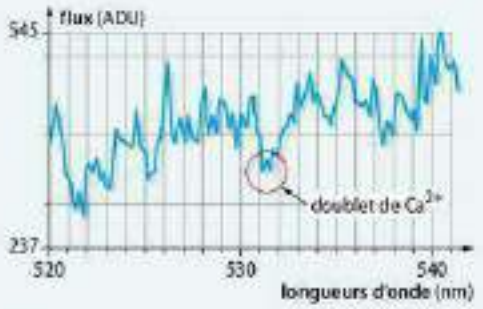
L'effet Doppler constitue un moyen d'investigation utilisé en astrophysique. Il permet de déterminer la vitesse des astres à partir de l'analyse spectrale de la lumière que ceux-ci émettent. On propose d'étudier l'étoile double HD 80715 qui se situe dans la galaxie NGC 691.

Montrer comment l'effet Doppler permet de mesurer la vitesse d'une étoile et de détecter la présence d'une étoile double, non détectable par un télescope.

DOC 1 Calcul de vitesse par décalage de longueur d'ondes

On note λ_0 la longueur d'onde de référence de la raie étudiée dans le spectre (source immobile par rapport à l'observateur) et λ la longueur d'onde de la radiation émise par la source en mouvement. Lorsqu'une galaxie, comme NGC 691, s'éloigne de la Terre, la formule de Doppler donnant la vitesse d'éloignement v de la source lumineuse par rapport à l'observateur terrestre est : $v = c \cdot \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$.

DOC 2 Extrait du spectre de la galaxie NGC 691



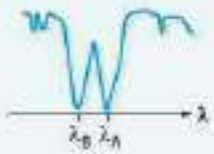
Source : Observatoire de Haute Provence, logiciel libre Salsaj.

DOC 3 Effet du mouvement des deux composantes d'une étoile double sur une raie d'absorption si l'axe reliant les deux étoiles est perpendiculaire à l'axe de visée.

A Configuration

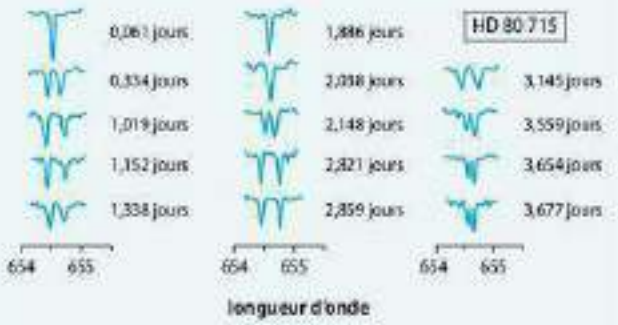


B Spectre observé (extrait)



Effet du mouvement des deux composantes d'une étoile double sur une raie d'absorption si l'axe reliant les deux étoiles est perpendiculaire à l'axe de visée.

DOC 4 Évolution temporelle de la position de la raie Hα dans le spectre de l'étoile double HD 80715



Source : Observatoire de Paris/U.F.E

DONNÉES

- Longueur d'onde médiane λ_0 du doublet de Ca^{2+} mesurée sur Terre pour une source au repos : 526,8 nm.
- Célérité de la lumière dans le vide : $c = 2{,}9979 \times 10^8$ m · s^{-1}.

VOCABULAIRE

- **Étoile double** : c'est un système stellaire composé de deux étoiles proches en orbite autour du même point (ce point étant le centre d'inertie G du système).

37 Quelle longueur d'onde ? RÉSOLUTION DE PROBLÈME

MODÉLISER ET VALIDER

30 min

COM Présenter une démarche de manière argumentée, synthétique et cohérente

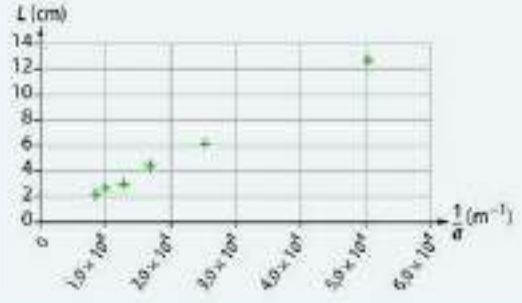
Un granulomètre est un appareil de mesure de précision qui permet de déterminer le diamètre d'un petit grain.

DOC 1 Le granulomètre

Pour vérifier la valeur de la longueur d'onde λ d'une diode laser utilisée dans un appareil de granulométrie, on intercale des fentes de différentes largeurs sur le trajet du faisceau laser. Sur un écran placé à une distance $D = 2{,}00$ m des fentes, on observe une figure de diffraction. L représente la largeur de la tâche centrale et θ_0 l'angle caractéristique de diffraction exprimé en radian. Expérimentalement, on mesure la largeur de la tache centrale L pour des fentes calibrées de différentes largeurs a. On porte les valeurs obtenues sur le graphique ci-contre.

Le fabriquant de l'appareil indique que deux diodes laser de longueurs d'onde 632 nm et 810 nm sont utilisées dans cet instrument de mesure.

DOC 2 Évolution de la tâche centrale de diffraction



DOC 3 Incertitude-type sur la longueur d'onde

L'incertitude-type sur la longueur d'onde λ, notée $u(\lambda)$, peut être déterminée à partir de la relation suivante :

$$u(\lambda) = \lambda \cdot \sqrt{\left(\frac{u(D)}{D}\right)^2 + \left(\frac{u(k)}{k}\right)^2}$$

L'incertitude-type sur la valeur du coefficient directeur est donnée par le tableur grapheur, soit $u(k) = 1{,}2 \times 10^{-7}$ USI.

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Donner la relation qui lie λ, θ_0 et a.
On fait l'hypothèse que l'angle θ_0 est petit. Dans ce cas, on peut écrire $\tan\theta_0 = \theta_0$ avec θ_0 en radian.

2. À l'aide du doc. 2, démontrer que la largeur de la tâche centrale est donnée par l'expression : $L = k\frac{1}{a}$, avec $k = 2\lambda D$

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

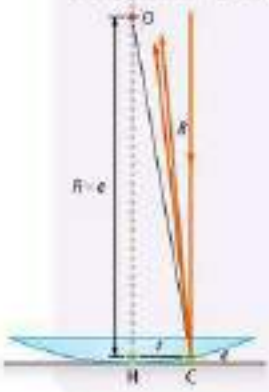
Déterminer la longueur d'onde λ de la diode laser utilisée en utilisant les documents fournis. Exprimer le résultat avec son incertitude-type (VOIR FICHE MÉTHODE ➡ p. 538)

VERS LE SUP'

38 Les anneaux de Newton

Les anneaux de Newton se forment au voisinage du « coin d'air » formé par une lentille convergente plan-convexe placée au contact d'une lame plane à faces parallèles.

Les rayons qui se réfléchissent sur la face convexe de la lentille interfèrent avec ceux qui se réfléchissent sur la face supérieure de la lame. On supposera que la lentille est parfaitement en contact avec le plan ($h = 0$).



Données : *R est le rayon de courbure de la lentille ; r est la distance entre l'axe de la lentille et le point où le rayon lumineux frappe la partie convexe de la lentille ; e l'épaisseur entre la lentille et la surface plane.*

La différence de chemin optique s'écrit : $\delta = 2e + \frac{\lambda}{2}$,

avec, λ la longueur d'onde de la lumière incidente (le terme $\frac{\lambda}{2}$ correspond au déphasage de l'onde lors de la réflexion sur la surface plane).

1. a. En appliquant le théorème de Pythagore dans le triangle OHC, montrer qu'on peut écrire : $e^2 - 2eR + r^2 = 0$.

b. Résoudre ce polynôme du second degré de variable e, en montrant que seule une des racines en physiquement possible.


Les anneaux de Newton

c. En déduire que la différence de chemin optique peut s'écrire $\delta = 2R\left(1 - \sqrt{1 - \frac{r^2}{R^2}}\right) + \frac{\lambda}{2}$.

2. En mathématiques, on peut faire l'approximation, si x est proche de 0 :

$$\sqrt{1-x} \approx 1 - \frac{x}{2}.$$

Montrer que la différence de chemin optique s'écrit alors :

$$\delta = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2}.$$

En déduire que le rayon r_k du k-ième anneau sombre de la figure d'interférence s'exprime : $r_k = \sqrt{Rk\lambda}$.

VIDÉO Préparer l'ECE

Diffraction et photographie d'étoiles

TABLEUR-GRAPHEUR

Contexte

L'objectif est d'expliquer les aigrettes de diffraction, ces lignes en forme de croix, présentes sur les photographies d'étoiles prises avec un télescope, et de modéliser la courbe de l'angle caractéristique de diffraction en fonction de la largeur de la fente.

Documents mis à disposition



Aigrettes de diffraction



Vue de l'intérieur du télescope

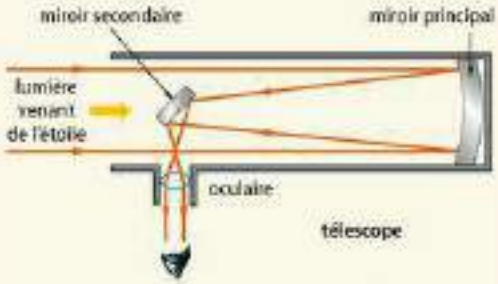


Schéma du trajet de la lumière dans un télescope

Matériel mis à disposition

- un ordinateur muni d'une caméra disposée sur un support réglable, d'un logiciel de traitement d'images et d'un tableur grapheur
- une source laser
- un écran translucide
- Plusieurs « araignées » en fils (modélisant le support de miroir secondaire) avec des épaisseurs connues, notées a, et des formes différentes.
- un double-mètre ruban

Travail à effectuer

1. (ANA) **Proposition de protocole expérimental** *(30 min conseillées)*

À partir des documents et de la liste du matériel disponible, proposer un protocole expérimental permettant de montrer l'influence du support du miroir secondaire sur les aigrettes de diffraction observées et de mesurer la tâche centrale de diffraction à l'aide d'un logiciel dédié.

Attention de ne jamais regarder dans la direction du faisceau laser et faire attention aux multiples réflexions possibles.

Être en mesure de présenter le protocole

2. (REA) **Mise en œuvre du protocole expérimental proposé** *(20 min conseillées)*

1. Mettre en œuvre le protocole et procéder à l'acquisition de la figure de diffraction par l'intermédiaire de la caméra.
2. Dire quelle est l'influence du support du miroir secondaire sur les aigrettes de diffraction.
3. Mesurer la largeur de la tâche centrale de diffraction pour des « araignées » de fils d'épaisseurs différentes à l'aide du logiciel de traitement d'images. En déduire l'angle caractéristique de diffraction θ. Pour chaque mesure, donner son incertitude-type.

Être en mesure de présenter l'acquisition et le traitement informatisé

3. (VAL) **Exploitation du résultat obtenu** *(10 min conseillées)*

1. À l'aide d'un tableur grapheur, modéliser la courbe expérimentale $\theta = f(a)$ par une fonction du type $\theta = k \cdot a^n$, avec n la puissance à déterminer.
2. Identifier une source d'incertitude possible dans les mesures réalisées.

Défaire le montage et ranger la paillasse.

PISTE POUR LE GRAND ORAL PRÉPA BAC

Pour se préparer à l'Oral
➥ Livret LES CLÉS DU BAC
(en début de manuel)

UNE QUESTION

Comment l'effet Doppler permet-il d'effectuer un diagnostic médical?

Enjeu de la question

On parle souvent de l'effet Doppler afin de mesurer des vitesses. Il est difficile de diagnostiquer des symptômes sans être invasif.

Proposition de plan de présentation

1. Définition de l'effet Doppler. Schéma et formules.
2. Les applications courantes de l'effet Doppler.
   a) Les mesures de vitesses d'ondes, notamment ultrasonores.
   b) Les décalages de longueurs d'onde en astronomie.
3. L'effet Doppler au service de la médecine.
4. Conclusion : amélioration des diagnostiques en cardiologie.

Les mots-clés

vitesse d'écoulement ▸ ultrasons ▸ problèmes circulatoires et cardiaques ▸ décalage Doppler ▸ expansion de l'Univers

Exemple de support de présentation



Principe de l'effet Doppler

QUESTIONS D'APPROFONDISSEMENT POSSIBLES



UN EXEMPLE DE PROJET PROFESSIONNEL

Les métiers relatifs au corps médical sont des métiers d'avenir. Ils sont nombreux et variés, c'est un secteur qui a besoin de nouveaux praticiens pour renouveler les cabinets médicaux ou centres de soins. C'est un secteur en pleine évolution car il convient d'intégrer constamment de nouvelles pratiques et nouvelles technologies.

Après le bac : *Bac + 10 diplôme d'état de Docteur en médecine spécialisée.*
Autres métiers : *manipulateur en électroradiologie médicale, ingénieur(e) imagerie médicale, dosimétriste en radiologie.*

Le **radiologue** examine ses patients en cabinet libéral ou à l'hôpital. Il est chargé de diagnostiquer les maladies à partir des symptômes de ses malades. Grâce à des techniques d'examen modernes et qui ne sont pas invasives, il peut traiter de manière adéquate et sans douleur pour celui qui souffre.



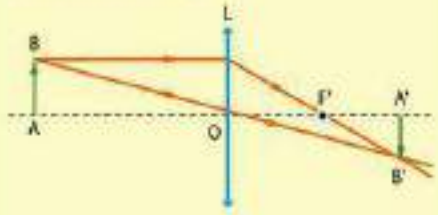
Avant d'aborder le chapitre

EN AUTONOMIE

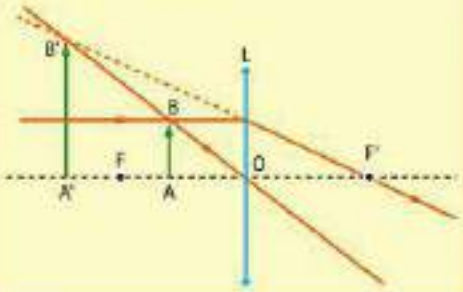
LES ACQUIS INDISPENSABLES

Seconde — 1re Enseignement de spécialité

- L'image A'B' est réelle, renversée et plus petite que l'objet.



- L'image A'B' est virtuelle, à l'endroit et plus grande que l'objet.



- Le **grandissement** $\overline{\gamma}$ est la grandeur algébrique définie par le rapport de la taille de l'image sur la taille de l'objet :

$$\text{sans unité} \rightarrow \overline{\gamma} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$$

Il dépend de la lentille utilisée et de la position de l'objet.

- Une image est **réelle** lorsqu'on peut la visualiser sur un écran, sinon elle est **virtuelle**.

- La **relation de conjugaison** donne le lien entre la position de l'objet et la position de son **image conjuguée** à travers la lentille :

position de l'image → $\frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{\overline{OA}} + \frac{1}{f'}$ ← distance focale

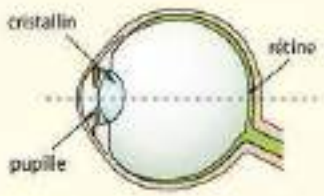
position de l'objet

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

Pour chaque situation, rédiger une réponse qui explique en quelques lignes le raisonnement.

SITUATION 1

L'œil est capable d'accommoder pour observer des objets situés à des distances différentes.



Comment expliquer ce phénomène ?

SITUATION 2

À quelle distance d'une lentille convergente faut-il placer un objet AB pour que la lentille en donne une image A'B' à l'infini ?

SITUATION 3

Un gemmologue observe une pierre précieuse située à 6,0 cm d'une loupe de distance focale de 75 mm.

Calculer la valeur du grandissement $\overline{\gamma}$ dans ces conditions d'observation.



CHAPITRE

18

PHYSIQUE

Formation d'images



L'observation des objets lointains nécessite l'utilisation d'instruments d'optique particuliers comme la lunette astronomique. Quel est son principe de fonctionnement ?

→ EXERCICE 25

NOTIONS ET CONTENUS

- Modèle optique d'une lunette astronomique avec objectif et oculaire convergent.
- Grossissement.

CAPACITÉS EXPÉRIMENTALES

- Réaliser une maquette de lunette astronomique ou utiliser une lunette commerciale pour en déterminer le grossissement. → Activités 1 et 3
- Vérifier la position de l'image intermédiaire en la visualisant sur un écran. → Activité 3

TP

COMPÉTENCES :
(APP) Représenter la situation par un schéma
(RÉA) Mettre en œuvre un protocole expérimental

Maquette d'une lunette astronomique afocale

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

Une lunette astronomique est un instrument d'optique destiné à observer les astres ou les objets éloignés.

Comment modéliser une lunette afocale sur le banc d'optique ?

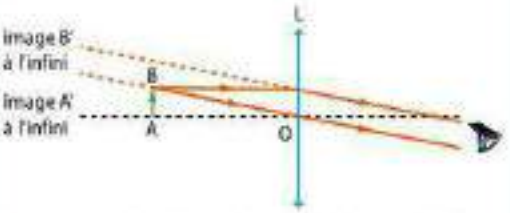


DOC 1 Constitution d'une lunette astronomique

Une lunette astronomique peut se résumer à un tube muni de lentille convergente à chaque extrémité. Celle qui est tournée vers le ciel capte la lumière et concentre les rayons lumineux issus de l'objet éloigné : c'est l'objectif. La deuxième lentille, l'oculaire permet à l'œil d'observer, sans accommoder, une image grossie de l'objet visé.

DOC 2 Modélisation d'un objet à l'infini

En plaçant un objet AB dans le plan du foyer objet d'une lentille convergente, on obtient une image A'B' à l'infini qui peut jouer le rôle d'objet pour la lunette astronomique.



Les rayons lumineux issus de l'image A'B' qui arrivent dans l'œil proviennent de l'infini.

VOCABULAIRE

- Une lunette astronomique qui donne d'un objet à l'infini une image à l'infini est dite **afocale**.

DOC 3 Matériel disponible

- banc d'optique
- objet à l'« infini »
- lentille convergente de distance focale $f' = 5{,}0$ cm
- lentille convergente de distance focale $f' = 33$ cm
- 2 tubes emboîtés pouvant coulisser l'un dans l'autre
- pinces pour maintenir l'ensemble sur le banc d'optique



PISTES DE RÉSOLUTION

1 À partir du matériel disponible, construire une lunette afocale au travers de laquelle on peut observer une image grossie de l'objet à « l'infini ».

2 a. Réaliser un schéma à l'échelle de la lunette ainsi réalisée en faisant apparaître les foyers objet et image de l'objectif et de l'oculaire.

b. Construire l'image A_1B_1 par l'objectif d'un objet AB qui serait situé « à l'infini ».

c. Construire l'image finale A'B' par l'oculaire de l'image intermédiaire A_1B_1 obtenue.

CONCLUSION

3 a. Parmi les deux lentilles utilisées, identifier celle qui joue le rôle de l'oculaire et celle qui joue le rôle de l'objectif.

b. Quelle distance doit séparer l'oculaire de l'objectif pour que la lunette soit afocale ?

Je réussis si...

- **Je sais schématiser un montage d'optique.**
- **Je sais identifier l'objectif et l'oculaire d'une lunette.**
- **Je sais représenter le faisceau émergent issu d'un point objet situé « à l'infini » et traversant une lunette afocale.**

COMPÉTENCES :
APP Rechercher et organiser l'information en lien avec la problématique étudiée
VAL Faire preuve d'esprit critique

L'infini, c'est loin ?



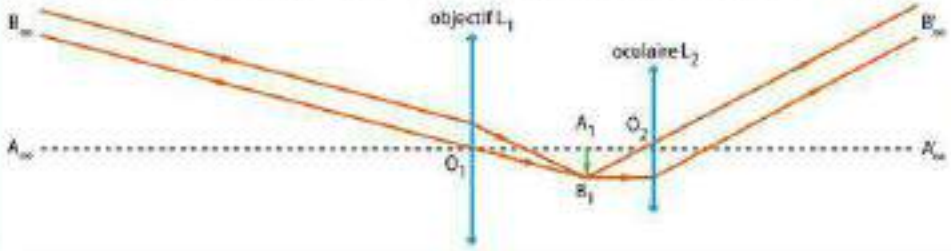
LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

Dans le cadre de l'étude du principe de fonctionnement d'une lunette afocale, le professeur propose à ses élèves d'utiliser un objet suffisamment éloigné de l'objectif pour pouvoir considérer qu'il est situé à l'infini.

À partir de quelle distance peut-on estimer que cette approximation est acceptable ?

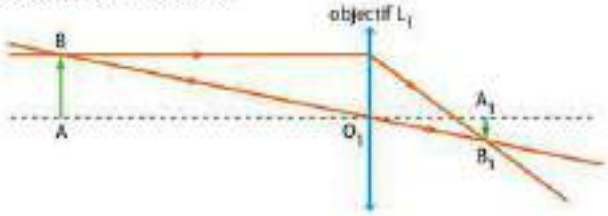
DOC 1 Modélisation de la visée d'un objet situé à l'infini par la lunette

Lorsqu'on vise un objet éloigné $A_\infty B_\infty$ à travers une lunette, l'image finale A'B' donnée par l'oculaire est située à l'infini pour qu'un œil normal puisse l'observer sans accommodation.



DOC 2 Modélisation de la visée d'un objet moins éloigné par l'objectif

Lorsque l'objet AB se trouve à une distance *d* finie de la lunette, il faut modifier la distance objectif-oculaire pour que l'observation puisse se faire sans accommodation.



DOC 3 Une autre relation de conjugaison

Pour déterminer des positions sur l'axe optique, on a l'habitude d'appliquer la relation de conjugaison établie par Descartes :

$$\frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{\overline{OA}} + \frac{1}{f'}$$

Il est parfois plus facile d'utiliser la relation de conjugaison suivante établie par Newton :

$$\overline{FA} \times \overline{F'A'} = -f'^2$$

EXPLOITATION ET ANALYSE

1 Visée d'un objet situé à l'infini

a. Au niveau de quel point particulier se forme l'image intermédiaire ?

b. À quelle distance de l'objectif faut-il placer l'oculaire pour qu'un œil normal puisse observer sans effort ? Justifier.

2 Visée d'un objet moins éloigné

a. Utiliser la relation de conjugaison de Descartes pour situer la position de l'image intermédiaire par rapport au foyer image F'_1 de l'objectif L_1.

b. Dans quel sens faut-il déplacer l'oculaire pour que l'image finale A'B' soit observable sans effort par un œil normal ?

c. Utiliser la relation de conjugaison de Newton pour calculer la distance dont il faut déplacer l'oculaire pour viser successivement un objet situé à 1,0 km, à 100 m, à 10 m puis à 1,0 m de l'objectif de distance focale 20 cm.

3

a. Estimer l'incertitude-type $u(d)$ sur la mesure d'une distance réalisée sur le banc d'optique gradué en millimètres.

b. Déterminer la valeur de la distance entre l'objet visé et l'objectif à partir de laquelle la conséquence de l'approximation sera masquée par cette incertitude.

CONCLUSION

4 Conclure quant à la signification du terme « à l'infini ». De quelle caractéristique de la lunette dépend la distance limite déterminée ?

Je réussis si...

- **Je sais déterminer la position de l'image intermédiaire donnée par l'objectif d'une lunette astronomique.**

TP

COMPÉTENCES :
APP Représenter la situation par un schéma
RÉA Mettre en œuvre un protocole expérimental

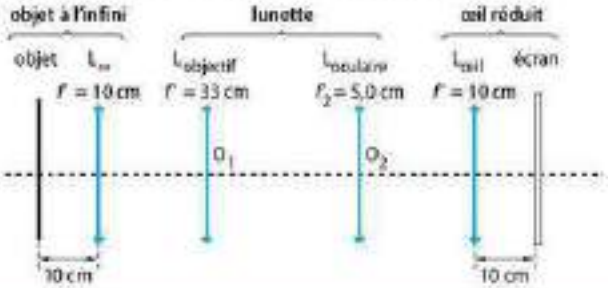
Caractéristiques d'une lunette afocale

Sur la notice d'une lunette astronomique commerciale on peut lire deux valeurs : 250 et 80. Le premier nombre indiqué est sans dimension et le second est exprimé en mm. À quelles caractéristiques de la lunette correspondent ces deux nombres ?



DOC 1 Schéma du dispositif expérimental

L'objectif donne de l'objet AB, à l'infini, une image intermédiaire A_1B_1 qui joue le rôle d'objet pour l'oculaire. L'image définitive est notée A'B'.



DOC 2 Grossissement d'un instrument d'optique

Le grossissement G d'une lunette est défini comme le rapport : $G = \dfrac{\theta'}{\theta}$

θ' est l'angle sous lequel l'image définitive A'B' est vue à travers la lunette ;
θ est l'angle sous lequel l'objet est vu à l'œil nu.

Remarques :
- θ correspond également à l'angle que forment les rayons issus de l'objet à l'infini avec l'axe optique de la lunette.
- Dans l'approximation des petits angles, on peut considérer que $\tan(\theta) = \theta$.

VOCABULAIRE
Une lunette astronomique qui donne d'un objet à l'infini une image à l'infini est dite **afocale**.

EXPÉRIMENTATION ET EXPLOITATION

1 Formation des images successives

- Positionner les éléments du montage optique dans l'ordre indiqué par le document 1.
- Régler la distance entre l'objectif et l'oculaire de telle manière qu'on observe une image nette sur l'écran de l'œil réduit.

a. La position de la lunette sur le banc a-t-elle une importance ?

b. Où se situe l'image finale $\overline{A'B'}$ donnée par la lunette ?

c. Mesurer la distance $\overline{O_1O_2}$ entre l'objectif et l'oculaire et retrouver la relation entre O_1O_2, f_1' et f_2' qui permet de vérifier que la lunette ainsi réglée est afocale.

d. Schématiser la lunette avec une échelle horizontale de 1/4 et faire apparaître les foyers de l'objectif et de l'oculaire.

- Retirer l'oculaire et placer un écran à la place.
- Déplacer l'écran de façon à observer l'image intermédiaire nette.

2 a. Dans quel plan particulier doit se former cette image intermédiaire $\overline{A_1B_1}$? Vérifier que c'est bien le cas.

b. Comment est orientée l'image intermédiaire $\overline{A_1B_1}$ par rapport à l'objet $\overline{AB}$?

c. Sur le schéma précédent, représenter l'image intermédiaire $\overline{A_1B_1}$ et construire le trajet d'un faisceau lumineux issu du point B à l'infini qui arrive au point B_1 puis construire l'image définitive A'B' donnée par l'oculaire.

3 Grossissement de la lunette afocale

Faire apparaître les angles θ et θ' sur le schéma précédent.

a. En appliquant les relations trigonométriques, montrer que dans le cas d'une lunette afocale : $G = \dfrac{f_1'}{f_2'}$.

b. En déduire pourquoi l'oculaire d'une lunette est nécessairement plus convergent que l'objectif.

c. Calculer le grossissement G de la lunette étudiée.

TP

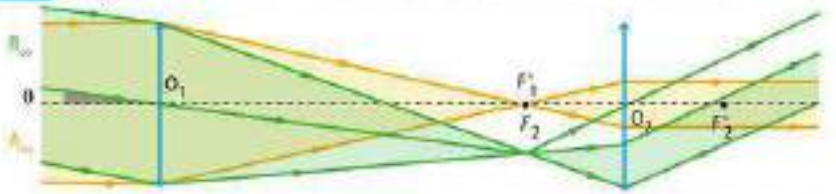
COMPÉTENCES :
APP Rechercher et organiser l'information
RÉA Mettre en œuvre les étapes d'une démarche

Caractéristiques d'une lunette afocale (suite)

DOC 3 Cercle oculaire

Le cercle oculaire correspond à l'image de la monture de l'objectif par l'oculaire. C'est à cet endroit qu'il faut placer la pupille de l'œil pour recevoir le maximum de lumière en provenance de l'objet visé.

DOC 4 Trajet de faisceaux lumineux à travers une lunette afocale



La lunette vise un objet AB situé à l'infini : le point A est dans la direction de l'axe optique et le point B dans la direction donnée par l'angle θ.

Le faisceau jaune correspond à la lumière provenant du point A collectée par l'objectif et le faisceau vert à la lumière provenant du point B.

DOC 5 Collecter la lumière

Lorsqu'on observe des étoiles à travers une lunette, celles-ci apparaissent sous forme de points lumineux comme à l'œil nu. Elles sont trop éloignées de la Terre pour qu'on puisse observer leur surface. Dans ces conditions, la lunette joue le rôle de collecteur de lumière : la quantité de lumière qui pénètre dans l'œil après avoir traversé la lunette est plus importante que celle qui pénètrerait directement dans l'œil.

Cela explique qu'on observe davantage d'étoiles avec une lunette astronomique qu'à l'œil nu.



EXPLOITATION ET ANALYSE

4 Cercle oculaire

a. Reproduire le schéma du document 4 et déterminer graphiquement la position du cercle oculaire, notée C.

- Retirer l'œil réduit.
- Positionner l'oculaire à la même place que précédemment.
- Rechercher l'image nette de l'objectif en déplaçant l'écran.

b. Sur le montage expérimental, relever la position $\overline{O_2C}$ du cercle oculaire par rapport à l'oculaire et mesurer son diamètre d_{CO}.

c. Appliquer les relations de conjugaison et de grandissement pour calculer la position $\overline{O_2C}$ du cercle oculaire et le diamètre d_{CO} du cercle oculaire.

Vérifier la concordance des résultats obtenus avec les valeurs expérimentales.

d. Quel est l'intérêt de placer son œil au niveau du cercle oculaire ?

5 Luminosité des images

- Remplacer l'objet par un trou source qui jouera le rôle d'étoile.
- Observer cette étoile à travers la lunette afocale.
- Retirer la lunette et observer l'« étoile » à l'œil nu.

a. Comparer la luminosité de l'étoile dans les deux cas.

b. En prenant appui sur les informations du document 5, réaliser deux schémas qui illustrent cette observation.

c. Quel paramètre de la lunette conditionne la luminosité des images observées ?

CONCLUSION

6 a. À quelles caractéristiques correspondent les deux nombres indiqués sur la notice de la lunette astronomique commerciale ?

b. Déterminer les caractéristiques de la lunette modélisée au laboratoire.

Je réussis si...

- **Je sais réaliser un montage optique comportant deux lentilles minces.**
- **Je sais vérifier la position de l'image intermédiaire en la visualisant sur un écran.**
- **Je sais représenter le schéma d'une lunette afocale modélisée par deux lentilles minces convergentes.**
- **Je sais établir l'expression du grossissement d'une lunette afocale.**

1 Fonctionnement d'une lunette astronomique

Constitution

La lunette astronomique est un instrument d'optique destiné à l'observation des astres ou des objets très éloignés (FIG. 1).

Une lunette astronomique est formée de deux systèmes optiques (FIG. 2) :
– un **objectif** orienté vers l'**objet** à observer ;
– un **oculaire** devant lequel on place l'œil.

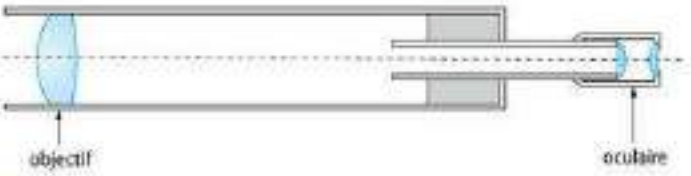


FIG. 2 Schéma simplifié d'une lunette astronomique.

Remarque. L'oculaire d'une lunette astronomique est un système optique convergent composé d'une association de plusieurs lentilles.

Une lunette astronomique qui donne d'un **objet à l'infini**, une **image à l'infini**, donc observable **sans accommodation** pour un œil normal, est dite **afocale**.



FIG. 1 L'objectif de la grande lunette de l'Observatoire de Meudon a une distance focale $f'_1 = 16$ m pour une distance focale de l'oculaire $f'_2 = 4$ cm.

Modélisation

Une lunette astronomique peut être modélisée par deux lentilles convergentes alignées le long d'un même axe optique.

Dans le cas d'une lunette afocale, **le foyer image F'_1 de l'objectif coïncide avec le foyer objet F_2 de l'oculaire** (FIG. 3).

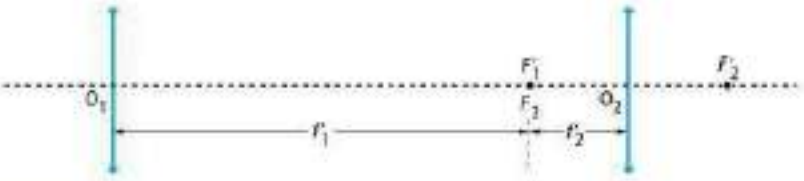


FIG. 3 Modélisation d'une lunette astronomique afocale.

L'objectif L_1, de **grande distance focale f'_1**, donne de l'objet $\overline{AB}$ situé à l'infini, une image intermédiaire $\overline{A_1B_1}$ dans son plan focal image.

L'oculaire L_2 de **distance focale f'_2 beaucoup plus faible**, donne de l'image intermédiaire $\overline{A_1B_1}$, une image $\overline{A'B'}$ à l'infini pour que l'œil n'ait pas besoin d'accommoder (FIG. 4).



FIG. 4 Étapes de la construction de l'image donnée par une lunette astronomique.



Une animation pour observer le trajet des rayons lumineux à l'intérieur d'une lunette astronomique

2 Formation des images

Construction graphique

L'astre qui joue rôle de l'objet AB est situé à l'infini (FIG. 3). Le point A est situé sur l'axe optique et les rayons lumineux issus de B pénètrent dans la lunette en formant un angle θ avec l'axe optique.

Pour construire l'image intermédiaire, il suffit de prolonger le rayon lumineux issu de B (en orange sur la FIG. 4) qui passe par le centre optique O_1 de l'objectif et qui n'est pas dévié : le point B_1 correspond à son intersection avec le plan focal image de l'objectif. Tous les rayons lumineux issus du point B viennent alors converger au point B_1.

L'image intermédiaire se forme dans le plan focal image de l'objectif qui coïncide avec le plan focal objet de l'oculaire dans le cas de la lunette afocale.

L'image intermédiaire A_1B_1 étant située dans le plan focal objet de l'oculaire l'image définitive A'B' se formera à l'infini dans la direction θ', donnée par le rayon issu du point B_1 (en noir sur la FIG. 4) qui traverserait l'oculaire en passant par son centre optique O_2 sans être dévié Tous les rayons lumineux issus de B_1 émergent de la lunette dans la direction θ'.

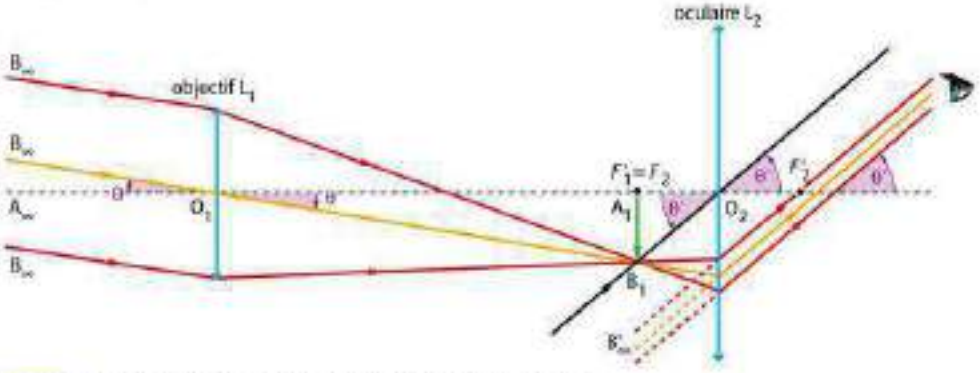


FIG. 4 Marche de trois rayons à travers une lunette afocale.

Remarque. Les angles sont orientés entre l'axe optique et le rayon lumineux. θ' est orienté dans le sens trigonométrique : il est compté positivement ; θ est négatif.

Relation de conjugaison

Appliquée à l'objectif

$$\frac{1}{\overline{O_1A_1}} - \frac{1}{\overline{O_1A}} = \frac{1}{f'_1}$$

L'objet AB étant à l'infini :

$$\overline{O_1A} \to \infty \text{ donc } \frac{1}{\overline{O_1A}} \to 0$$

soit $\overline{O_1A_1} = f'_1 = \overline{O_1F'_1}$

Le point A_1 image du point A est donc confondu avec le foyer image F'_1 et **l'image intermédiaire A_1B_1 se forme dans le plan focal image de l'objectif.**

Appliquée à l'oculaire

$$\frac{1}{\overline{O_2A'}} = \frac{1}{\overline{O_2A_1}} + \frac{1}{f'_2}$$

L'image A'B' étant à l'infini :

$$\overline{O_2A'} \to \infty \text{ donc } \frac{1}{\overline{O_2A'}} \to 0$$

soit $\overline{O_2A_1} = -f'_2 = -\overline{O_2F'_2} = \overline{O_2F_2}$

Le point A_1 image du point A est donc confondu avec le foyer objet F_2 et **l'image intermédiaire A_1B_1 se forme dans le plan focal objet de l'oculaire.**

VOCABULAIRE

Un plan perpendiculaire à l'axe optique de la lentille qui passe par un foyer est appelé **plan focal**.

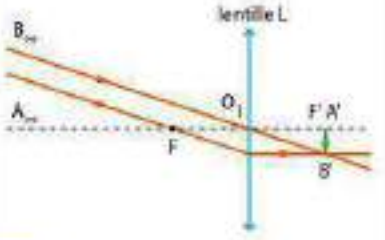


FIG. 5 L'image d'un objet situé à l'infini se forme dans le plan focal image de la lentille convergente.

VOCABULAIRE

Vu de l'extérieur de la lunette, tout faisceau lumineux parallèle qui pénètre dans la lunette en ressort parallèle. Comme la lunette semble ne pas avoir de foyer on dit qu'elle est **afocale**.

UN PONT VERS LES MATHS

Limite en l'infini de la fonction $\frac{1}{x}$

$$\lim_{x \to +\infty} \frac{1}{x} = 0$$

3 Caractéristiques d'une lunette

Grossissement

À travers la lunette, on voit l'astre comme s'il était situé à une distance plus petite que la distance réelle (FIG. 7).

EXEMPLE

Une lunette qui grossit 20 fois permet d'observer un astre comme s'il était placé à une distance 20 fois moins grande.

Le **grossissement** $\bar{G}$ d'une lunette est défini comme le rapport :

grossissement (sans unité) $\rightarrow \bar{G} = \dfrac{\theta'}{\theta}$ ← θ' : angle sous lequel l'image définitive A'B' est vue à travers la lunette ; ← θ : angle sous lequel l'objet AB est vu à l'œil nu

Remarque. Comme la taille de l'objet (lointain) et celle de l'image (virtuelle) ne sont pas accessibles, on ne détermine pas le **grandissement** mais le **grossissement.**

Dans le cas où la lunette est afocale, les points F_1, F_2 et A_1 sont confondus, on peut donc écrire dans les triangles $O_1A_1B_1$ et $O_2A_1B_1$, rectangles en A_1, (FIG. 6) :

$$\tan(\theta) = \theta = \frac{\overline{A_1B_1}}{O_1A_1} = \frac{\overline{A_1B_1}}{f_1'} \quad \text{et} \quad \tan(\theta') = \theta' = \frac{\overline{A_1B_1}}{O_2A_1} = \frac{\overline{A_1B_1}}{-f_2'}$$

Soit :

$$\frac{\theta'}{\theta} = \frac{\dfrac{\overline{A_1B_1}}{-f_2'}}{\dfrac{\overline{A_1B_1}}{f_1'}} = \frac{\overline{A_1B_1}}{-f_2'} \times \frac{f_1'}{\overline{A_1B_1}} = -\frac{f_1'}{f_2'}$$

Le **grossissement d'une lunette afocale** est une grandeur négative :

grossissement (sans unité) $\rightarrow \bar{G} = -\dfrac{f_1'}{f_2'}$ ← f_1' : distance focale de l'objectif ; ← f_2' : distance focale de l'oculaire

Remarque. La valeur absolue du grossissement devant être la plus élevée possible, la distance focale de l'objectif doit être nettement supérieure à celle de l'oculaire : $f_1' > f_2'$.

L'angle θ sous lequel un astre est vu depuis le lieu d'observation est également appelé diamètre apparent.

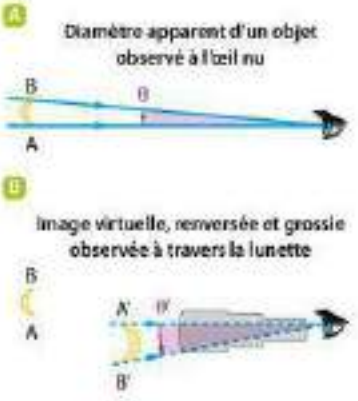
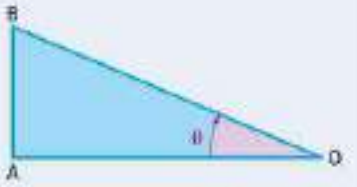


FIG. 7 Diamètre apparent et image virtuelle.

UN PONT VERS LES MATHS

Relation trigonométrique dans un triangle rectangle

Dans le triangle OAB, rectangle en A, on peut écrire :



$$\tan(\theta) = \frac{\overline{AB}}{\overline{OA}}$$

Diamètre de l'objectif

Les faisceaux lumineux collectés par la lunette sont limités par la **monture de l'objectif.**

Par définition, le **cercle oculaire** d'une lunette correspond à l'image donnée par l'oculaire de la **monture de l'objectif.** C'est à cet endroit qu'il faut placer l'œil pour recevoir un **maximum de lumière** en provenance de l'objet à l'infini.

Plus le **diamètre de l'objectif est grand**, plus la **quantité de lumière collectée** par la lunette et qui pénètre dans l'œil à la sortie de l'oculaire **est grande** (FIG. 8).

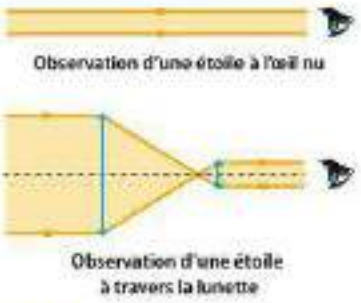
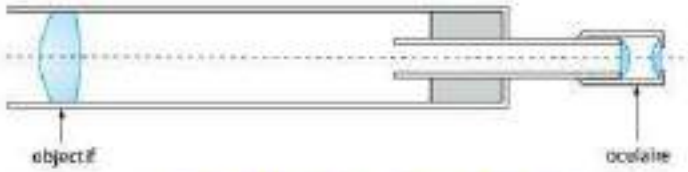


FIG. 8 La lunette collecte la lumière en provenance d'une étoile nous permettant ainsi de la voir alors qu'elle est invisible à l'œil nu.

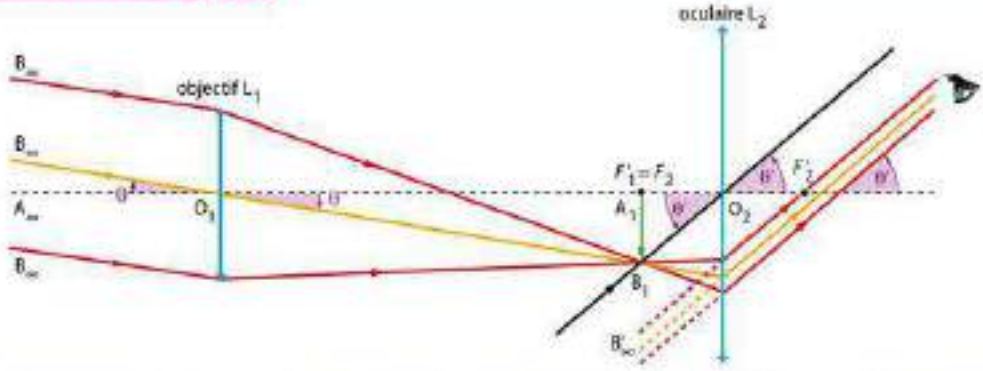
1 Fonctionnement d'une lunette astronomique

Une lunette astronomique est formée de deux systèmes optiques :
– un **objectif** (orienté vers l'objet à observer) de **distance focale** de l'ordre du **mètre** ;
– un **oculaire** (devant lequel on place l'œil) qui joue le rôle de loupe dont la distance focale est de l'ordre du **centimètre**.



Une lunette astronomique qui donne d'un **objet à l'infini**, une **image à l'infini**, donc observable sans accommodation pour un œil normal, est dite **afocale**. Le foyer image F'_1 de l'objectif **coïncide** avec le foyer objet F_2 de l'oculaire.

2 Formation des images



L'**image intermédiaire** se forme dans le **plan focal image** de l'objectif qui coïncide avec le **plan focal objet** de l'oculaire dans le cas de la **lunette afocale**.

3 Caractéristiques d'une lunette

Le **grossissement G** d'une lunette est défini comme le rapport :

grossissement (sans unité) $\rightarrow \boldsymbol{G} = \dfrac{\theta'}{\theta}$ — θ' : angle sous lequel l'image définitive A'B' est vue à travers la lunette ; θ : angle sous lequel l'objet AB est vu à l'œil nu

Le **grossissement d'une lunette afocale** s'écrit également :

grossissement (sans unité) $\rightarrow \boldsymbol{G} = -\dfrac{f'_1}{f'_2}$ — f'_1 : distance focale de l'objectif ; f'_2 : distance focale de l'oculaire

Le **rôle de la lunette** est de **collecter le maximum de lumière** provenant des astres observés : le **diamètre de l'objectif** doit donc être **important.**

Vérifier l'essentiel

EN AUTONOMIE

Pour chaque question, choisir la ou les bonnes réponses. ➡ SOLUTIONS EN PAGE 533

Flash PAGE corrigés détaillés

Flash PAGE QCM interactifs

1 Fonctionnement d'une lunette astronomique

	A	B	C
1 Lorsqu'on observe une étoile à travers une lunette astronomique, le faisceau :	traverse l'oculaire avant de pénétrer dans la lunette.	émerge par l'oculaire.	traverse l'objectif avant de pénétrer dans la lunette.
2 L'objectif est assimilé à une lentille convergente dont la distance focale est :	du même ordre de grandeur que celle de l'oculaire.	plus grande que celle de l'oculaire.	plus petite que celle de l'oculaire.
3 La distance qui sépare l'objectif ($f'_1 = 60$ cm) de l'oculaire ($f'_2 = 20$ mm) d'une lunette afocale vaut :	80 cm.	62 cm.	58 cm.

2 Formation des images

	A	B	C
4 Le faisceau issu d'un point situé à l'infini converge :	au foyer image de l'objectif.	au foyer objet de l'oculaire.	dans le plan focal image de l'objectif.
5 L'image intermédiaire est :	réelle à l'endroit.	réelle et renversée.	virtuelle et renversée.
6 Avec une lunette afocale, l'image intermédiaire se forme dans :	le plan focal image de l'objectif.	le plan focal objet de l'oculaire.	le plan focal image de l'oculaire.
7 L'image observée à travers la lunette est :	à l'endroit.	virtuelle.	renversée.

3 Caractéristiques d'une lunette

	A	B	C
8 La valeur absolue du grossissement $\overline{G}$ d'une lunette afocale correspond au rapport :	$\frac{f_{oculaire}}{f_{objectif}}$.	$\frac{f_{objectif}}{f_{oculaire}}$.	$\frac{diamètre_{objectif}}{f_{oculaire}}$.
9 Pour augmenter le grossissement d'une lunette, on peut :	augmenter le diamètre de l'objectif.	diminuer la distance focale de l'oculaire.	augmenter distance focale de l'objectif.
10 Pour une observation dans de bonnes conditions, l'œil doit être placé :	au niveau du foyer image de l'oculaire.	au niveau du cercle oculaire.	contre l'oculaire.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Acquérir les bases

1 Fonctionnement d'une lunette astronomique

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Représenter le schéma d'une lunette afocale modélisée par deux lentilles minces convergentes ; identifier l'objectif et l'oculaire.

➥ Acquérir les bases : 5A ➥ S'entraîner : 23 24 28

11 Vrai ou faux

Répondre par vrai ou par faux aux affirmations suivantes. Corriger celles qui sont fausses.

1. Dans une lunette astronomique, la distance focale de l'oculaire est toujours plus grande que celle de l'objectif.

2. Une lunette est dite afocale lorsque le foyer objet de l'oculaire coïncide avec le foyer image de l'objectif.

12 Choix de lentilles

Pour réaliser une maquette de lunette astronomique sur banc d'optique, on dispose de trois lentilles convergentes de distances focales respectives 50, 125 et 300 mm.

1. Quelle association est la plus judicieuse ? Argumenter la réponse.

2. Préciser quelle lentille joue le rôle de l'oculaire et de l'objectif.



13 L'association correcte

1. Parmi les modélisations suivantes, identifier celle qui correspond à une lunette astronomique afocale.

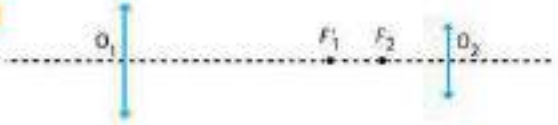
A



B



C



2. Expliquer pourquoi les autres ne conviennent pas.

14 Lunette afocale

Une lunette astronomique est composée :
- d'un objectif de distance focale 100 cm et de diamètre 10 cm ;
- d'un oculaire de distance focale 5 cm et de diamètre 6 cm.

1. Quelle distance O_1O_2 doit séparer les centres optiques de l'objectif et de l'oculaire pour que la lentille soit afocale ?

2. a. Réaliser le schéma de cette lunette à l'échelle 1/10 le long de l'axe optique et à l'échelle 1/2 dans la direction perpendiculaire.
b. Faire apparaître les foyers de l'oculaire et le foyer image de l'objectif.

2 Formation des images

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Représenter le faisceau émergent issu d'un point objet situé « à l'infini » et traversant une lunette afocale.

➥ Acquérir les bases : 1B ➥ S'entraîner : 22 24 31

DONNÉES

- Relation de conjugaison

$$\frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{\overline{OA}} + \frac{1}{f'}$$

- Relation de grandissement

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$$

15 Position de l'image intermédiaire

1. Appliquer la relation de conjugaison à l'objectif de la lunette astronomique pour montrer que l'image intermédiaire d'un objet situé à l'infini se forme dans le plan focal image de la lentille.

2. À quelle distance de l'objectif faut-il placer l'oculaire pour qu'un œil normal puisse observer l'image définitive sans accommoder ?

16 Construction graphique

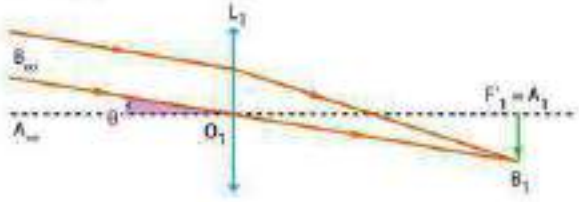
1. Sur le schéma de l'exercice 14, représenter un rayon lumineux provenant d'un point B situé à l'infini et incliné d'un angle θ par rapport à l'axe optique.

2. a. Déterminer, par construction la position du point B_1, image de B par l'objectif.
b. Dans quel plan particulier se forme cette image intermédiaire ?

3. a. Construire l'image définitive B', image de B_1 par l'oculaire.
b. Un œil normal doit il accommoder pour observer cette image ? Justifier la réponse.

17 Caractéristiques des images formées à travers une lunette

L'objectif L_1 de la lunette astronomique donne d'un objet AB de diamètre apparent θ, situé à l'infini, une image intermédiaire A_1B_1 comme indiqué sur le schéma suivant.



***Données** : le diamètre apparent de l'objet vaut 30' d'arc ; l'objectif de la lunette a une distance focale $f'_1 = 80$ cm ; l'oculaire de la lunette a une distance focale $f'_2 = 20$ mm.*

1. a. Déterminer par le calcul la taille de l'image A_1B_1.
b. Expliquer pourquoi il n'est pas possible de déterminer le grandissement.

2. a. À quelle distance de l'objectif faut-il placer l'oculaire pour que l'image définitive se forme à l'infini ?
b. L'image définitive est-elle réelle ou virtuelle ?
c. L'image définitive est-elle dans le même sens ou renversée par rapport à l'objet visé ?

3 Caractéristiques d'une lunette

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Établir l'expression du grossissement d'une lunette afocale.
  - Acquérir les bases : 19 — S'entraîner : 23 26 34
- Exploiter les données caractéristiques d'une lunette commerciale.
  - Acquérir les bases : 22 — S'entraîner : 23 26 34

18 Vrai ou faux

Répondre par vrai ou par faux aux affirmations suivantes. Argumenter soigneusement la réponse.

1. Le grossissement de la lunette dépend du diamètre de l'objectif et de la distance focale de l'oculaire.

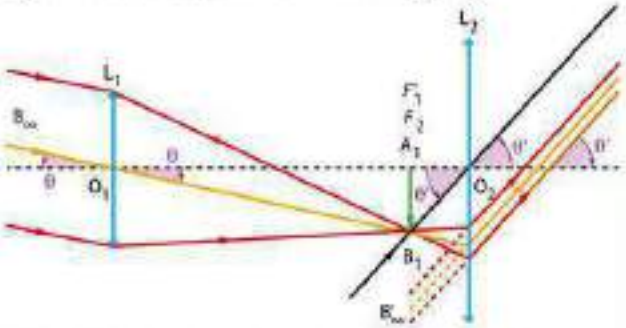
2. La qualité d'une lunette dépend à la fois du grossissement et du diamètre de l'objectif.

19 Grossissement d'une lunette afocale

La distance focale de l'objectif d'une lunette astronomique afocale est $f'_1 = 50$ cm et celle de l'oculaire est $f'_2 = 1{,}0$ cm.

1. Rappeler la définition du grossissement d'une lunette astronomique.

2. En prenant appui sur le schéma suivant, montrer que le grossissement s'exprime en fonction de f'_1 et f'_2.



3. En déduire la valeur du grossissement de cette lunette.

20 Oculaire au choix

Voici un extrait de la notice d'une lunette astronomique :

Ouverture : 50 mm **Longueur focale :** 600 mm
Livrée avec : 3 oculaires de 20 mm, 12 mm et de 4 mm

1. À quelles caractéristiques de la lunette correspondent les différentes valeurs exprimées en mm ?

2. Calculer les valeurs de grossissement possibles.

21 Une étoile double dans la constellation du cygne



Une lunette astronomique, dont le grossissement vaut 40, est utilisée pour observer l'étoile double Albiréo dans la constellation du cygne. L'axe optique de la lunette est dirigée vers l'une des étoiles et la distance angulaire qui sépare les deux étoiles vaut $\theta = 34$ secondes d'arc.

***Donnée :** le pouvoir séparateur de l'œil est estimé à une minute d'arc.*

1. Sous quel angle θ' l'observateur voit-il ces étoiles à travers l'instrument ?

2. Calculer la valeur minimale du grossissement qui permet la séparation de ces deux étoiles.

22 L'Universarium de Nice

D'importants travaux ont été réalisés à l'Observatoire de la Côte d'Azur pour le rendre plus accessible au grand public. La grande lunette de 76 cm avec 17,89 m de distance focale offre une échelle au foyer de 87 µm pour 1,0". Les oculaires disponibles permettent d'obtenir des valeurs de grossissement de – 1 800 et – 2 200.

1. À quelle grandeur caractéristique de la lunette correspond la valeur 76 cm ?

2. a. Construire, sur un schéma, l'image intermédiaire A_1B_1 donnée par l'objectif d'un objet AB situé à l'infini de diamètre apparent θ.
b. Calculer A_1B_1 et vérifier qu'un angle de 1" se traduit dans le plan focal de l'objectif par l'« échelle au foyer » annoncée.

3. Calculer la valeur des distances focales des oculaires disponibles.

Faire le point avant d'aller plus loin

PRÉPA BAC

Pour vérifier ses connaissances, répondre aux questions suivantes (sans regarder le cours !)

- Quels sont les critères de choix d'une lunette commerciale ?
- Modéliser une lunette astronomique afocale en situant les foyers des lentilles qui la constituent.
- Construire le faisceau émergent issu d'un point objet situé « à l'infini » après avoir traversé une lunette afocale.
- Établir l'expression du grossissement d'une lunette afocale en fonction des distances focales de l'objectif et de l'oculaire.
- Expliquer pourquoi le foyer image de l'objectif d'une lunette afocale est confondu avec le foyer objet de l'oculaire.
- Que signifie qu'une lunette commerciale a un grossissement égal à 20 ?
- Écrire la relation qui permet de calculer le grossissement d'un instrument d'optique en explicitant chaque grandeur et son unité.

Retrouver ces questions en version numérique — Flash PAGE cartes mémos

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Exercice résolu EN AUTONOMIE

23 Modélisation d'une lunette astronomique

Une lunette astronomique est modélisée sur un banc d'optique à l'aide de deux lentilles convergentes. Le montage expérimental est réglé de telle manière que l'objet AB, situé à l'infini, de diamètre apparent α donne une image définitive observable sans accommodation par un œil normal.

Données : *caractéristiques des lentilles utilisées*

	distance focale	*diamètre intérieur de la monture*
objectif	$f'_1 = 50$ cm	40 mm
oculaire	$f'_2 = 10$ cm	80 mm

1. a. Qualifier la lunette ainsi réglée.
b. Expliquer qualitativement à quelle position particulière se forme l'image intermédiaire donnée par l'objectif.
c. En déduire la distance qui sépare les deux lentilles sur le banc d'optique.

2. a. Représenter le schéma optique de la lunette avec une échelle horizontale 1/10.
b. Représenter le faisceau émergent issu du point objet B situé « à l'infini » qui traverse la lunette et construire l'image intermédiaire A_1B_1.

3. a. Établir l'expression du grossissement de cette lunette en fonction des distances focales de l'objectif et de l'oculaire.
b. Calculer la valeur du grossissement.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- Le réglage de la lunette donne des informations sur la distance qui sépare l'objectif de l'oculaire.
- Toutes les données sont nécessaires pour réaliser le schéma du montage à l'échelle.

LES VERBES D'ACTION

- **Qualifier** : caractériser par un mot ou une expression.
- **Expliquer qualitativement** : donner une justification à une observation ou une affirmation sans faire de calcul.
- **En déduire** : utiliser le résultat précédent pour répondre.
- **Établir** : utiliser une définition ou une loi pour répondre.

QUELQUES CONSEILS

1. a. L'énoncé précise que l'image d'un objet à l'infini se situe à l'infini.
b. Utiliser les propriétés des foyers d'une lentille.

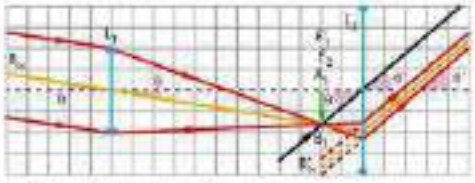
2. Réaliser un schéma soigné en respectant l'échelle demandée.

3. a. Il faut appliquer les relations de trigonométrie en faisant l'approximation des petits angles.
b. Les données sont exprimées avec 2 chiffres significatifs donc le résultat également.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. a. Une lunette qui donne d'un objet à l'infini une image à l'infini est afocale.
b. L'objectif donne de l'objet à l'infini une image intermédiaire située au foyer image de l'objectif. Comme l'oculaire donne de cette image intermédiaire une image définitive à l'infini, l'image intermédiaire doit être située au foyer objet de l'oculaire.
c. Le foyer image F'_1 et le foyer objet F_2 doivent être confondus donc $\overline{O_1O_2} = \overline{O_1F'_1} + \overline{F'_1F_2} + \overline{F_2O_2} = f'_1 + f'_2$. La distance qui sépare les deux lentilles vaut 50 + 10 soit 60 cm.

2. Modélisation de la lunette :



3. a. Par définition, le grossissement de la lunette est le rapport :

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha}.$$

Dans les triangles rectangles $O_1A_1B_1$ et $O_2A_1B_1$, rectangle en A_1, on peut écrire respectivement :

$$\tan(\alpha) = \alpha = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{O_1A_1}} = \frac{\overline{A_1B_1}}{f'_1} \text{ et } \tan(\alpha') = \alpha' = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{O_2A_1}} = \frac{\overline{A_1B_1}}{-f'_2}$$

Soit $G = \frac{\alpha'}{\alpha} = -\frac{f'_1}{f'_2}$

b. Le grossissement de la lunette ainsi réglée vaut $G = -\frac{50}{10} = -5$.

EXERCICE SIMILAIRE

24 Message à déchiffrer

Un observateur trop éloigné pour pouvoir déchiffrer l'indication d'un panneau utilise une lunette équipée d'un objectif de distance focale 300 mm et de l'oculaire de distance focale 50 mm.

1. a. Réaliser un schéma annoté de la marche, à travers l'objectif, d'un faisceau provenant d'un point B d'une lettre qui forme un angle β avec l'axe optique puis construire l'image intermédiaire A_1B_1.
b. À quelle distance de l'objectif faudrait-il placer un écran pour observer l'image intermédiaire ?

2. a. Positionner, sur le schéma, l'oculaire de telle manière que la lunette soit afocale puis construire le faisceau lumineux issu de B_1 qui traverse l'oculaire et faire apparaître l'angle β' sous lequel l'image A'B' sera observée à travers la lunette.
b. Montrer que le grossissement G de la lunette peut s'exprimer en fonction des distances focales de l'oculaire et de l'objectif.

3. Sachant qu'un grossissement de – 10 est nécessaire pour que les inscriptions soient visibles par l'observateur, la distance focale de l'oculaire utilisé permet-elle de déchiffrer l'indication ? Justifier la réponse.

S'entraîner pour maîtriser

SAVOIR RÉDIGER

25 Modélisation d'une lunette. Proposer une correction de la solution proposée à l'énoncé

Énoncé

On souhaite réaliser une lunette afocale sur le banc d'optique avec deux lentilles convergentes de distance focale respective 50 mm et 30 cm.

1. Préciser quelle lentille joue le rôle de l'oculaire, de l'objectif.

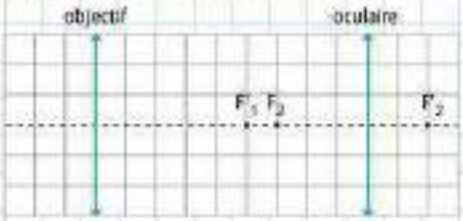
2. a. Réaliser un schéma annoté du montage en faisant apparaître les foyers des lentilles utilisées.
b. Quelle distance doit séparer les deux lentilles sur le banc ?

3. Calculer le grossissement $\bar{G}$ de la lunette ainsi modélisée.

Solution proposée par un élève

1. La distance focale de l'objectif est toujours plus grande que celle de l'oculaire donc l'objectif a une distance focale de 50 et l'oculaire de 30. ⟩ Attention aux unités des distances focales

2. a.



b. La distance qui doit séparer les deux lentilles doit être supérieure à 80. ⟩ Définition afocale à revoir

3. Par définition $\bar{G} = F'_1/F'_2 = 50/30 = 1,6666$ ⟩ Attention aux conversions et aux chiffres significatifs

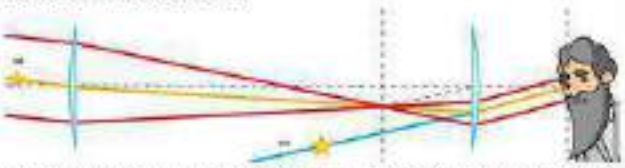
26 De la lunette de Galilée à celle de Kepler

HISTOIRE DES SCIENCES

Bien qu'il n'ait pas été l'inventeur du principe de la lunette astronomique, c'est Galilée (1564-1642) qui a réalisé celle qui lui a permis de découvrir les reliefs à la surface de la Lune. Il a fabriqué sa lunette en polissant deux lentilles : l'une concave et l'autre convexe.



Kepler (1571-1630) met au point un instrument basé sur deux lentilles convexes.



Le problème majeur de cet instrument est l'aberration chromatique : plusieurs images colorées d'un même astre se forment à une distance différente les unes des autres. Pour limiter ce désagrément, il faut diminuer la courbure des lentilles, les lunettes atteignent bientôt des longueurs démesurées.

1. Les lentilles convergentes sont-elles concaves ou convexes ?

2. Quelle est la différence essentielle entre l'image observée par Galilée et celle observée par Kepler ?

3. a. Expliquer pourquoi on observe des aberrations chromatiques lorsqu'un faisceau de lumière blanche traverse une lentille. Nommer le phénomène optique qui se produit.
b. Faut-il augmenter ou diminuer l'épaisseur de verre traversé pour limiter les aberrations ? Argumenter la réponse.
c. Justifier la taille atteinte par les lunettes astronomiques.

27 The great red task of Jupiter

By observing Jupiter using a telescope, one can observe a red task which corresponds to a gigantic high pressure of the planet's atmosphere.

Data : *the separating power of the eye is estimated at one minute of arc (1' = 1/60°).*



1. Calculate the apparent diameter of Jupiter when this planet with a diameter of 1.4×10^5 km is 6.3×10^8 km from Earth.

2. Which of the three 10 mm, 20 mm and 25 mm focal length eyepieces should you use to get the best magnification ?

3. Then calculate the apparent diameter of Jupiter through the telescope whose objective has a focal length of 600 mm.

4. Will the large red spot which measures approximately 1/6 the diameter of the planet, be visible through this telescope ?

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

28 Construction du cercle oculaire

Une lunette astronomique est modélisée par deux lentilles de même diamètre 4,0 cm et de distances focales 10 cm et 1,0 m.

1. a. Réaliser le schéma de cette lunette à l'échelle 1/10 le long de l'axe optique et à l'échelle 1 dans la direction perpendiculaire.
b. Construire le cercle oculaire de la lunette qui correspond à l'image donnée par l'oculaire de la monture de l'objectif.

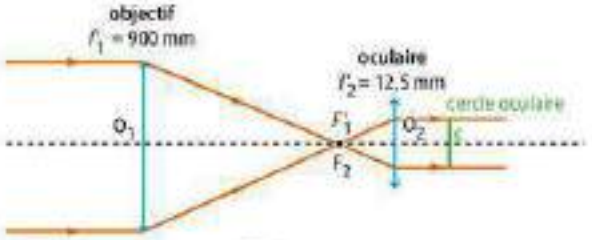


2. a. Tracer la marche d'un faisceau lumineux parallèle à l'axe optique, venant de l'infini et couvrant tout l'objectif.
b. Tracer la marche d'un faisceau lumineux formant un angle θ avec l'axe optique et couvrant tout l'objectif.
c. Expliquer pourquoi il est intéressant de placer l'œil de l'observateur au niveau du cercle oculaire.

3. Retrouver la position et le diamètre du cercle oculaire en appliquant les relations de conjugaison et de grandissement.

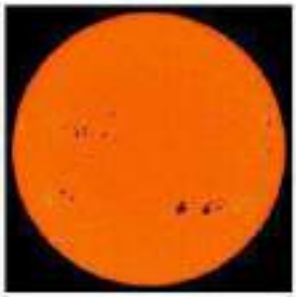
29 Attention au soleil

Pour évaluer le danger d'une observation du soleil à travers la lunette, on étudie la concentration d'énergie réalisée par l'instrument. En admettant qu'il n'y a pas de perte d'énergie lumineuse dans la lunette, on considère que la puissance lumineuse entrant dans la lunette par l'objectif en ressort par le cercle oculaire.



1. a. Calculer la position $\overline{O_2C}$ du cercle oculaire.
b. En déduire le diamètre d du cercle oculaire lorsque l'objectif utilisé a un diamètre D = 60 mm.
2. Déterminer le facteur de concentration défini comme le rapport des puissances lumineuses par unité de surface entre le cercle oculaire et l'objectif.
3. Sachant que le diamètre de la pupille de l'œil en plein jour est estimé à 3 mm, conclure sur la dangerosité de l'observation du ciel à travers une lunette.

30 Projection de l'image solaire



Il est possible d'observer le soleil sans danger, en projetant simplement son image sur un écran. C'est grâce à cette technique que Galilée découvrit les taches solaires au début du XVII^e siècle.

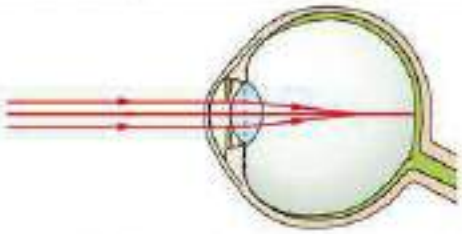
Pour ce faire, on fixe un écran à une distance $\overline{O_2A'}$ = 30 cm de l'oculaire.

1. Prévoir sans calcul le sens de déplacement de l'oculaire par rapport à l'objectif nécessaire à l'observation d'une image nette du soleil sur l'écran.
2. Calculer la valeur de ce déplacement dans le cas de la lunette étudiée dans l'exercice 29.
3. En déduire la dimension de l'image du soleil projetée sur l'écran.
4. Calculer la taille réelle de la tache solaire sachant que son image à l'écran mesure 6,1 mm.

Données : *Le soleil a un diamètre* $D_{soleil} = 1,39 \times 10^6$ *km et un diamètre apparent depuis la Terre* $\theta_{soleil} = 9,3 \times 10^{-3}$ *rad.*

31 Œil myope utilisant une lunette

Lors d'un TP, un élève myope place son œil au foyer image de la lunette astronomique afocale réglée par son binôme. Il doit accommoder pour observer une image nette.



Les distances focales des lentilles modélisant l'objectif et l'oculaire valent respectivement 60 cm et 10 cm.

1. Expliquer pourquoi il doit modifier le réglage de la lunette pour pouvoir observer sans accommoder.
2. Quand il n'accommode pas, il voit nettement les objets situés à 50 cm devant lui.
a. En considérant que le cercle oculaire est confondu avec le foyer image de l'oculaire, déterminer la distance à laquelle l'image intermédiaire A_1B_1 doit se former et préciser s'il faut rapprocher ou éloigner l'oculaire de l'objectif.
b. Réaliser un schéma de la situation sans souci d'échelle et faire apparaître les angles θ et θ' sous lesquels sont vus respectivement l'objet AB et l'image A'B' à travers la lunette.
3. L'objet AB est vu sous un angle $\theta = 2,0 \times 10^{-2}$ rad.
a. Calculer la taille de l'image intermédiaire A_1B_1.
b. En déduire la taille de l'image définitive A'B' ainsi que l'angle θ' sous lequel elle est vue par l'œil myope.
4. a. Calculer le grossissement de la lunette ainsi réglée.
b. Comparer ce grossissement à celui de la lunette afocale qui serait constituée des mêmes lentilles.

Coup de pouce

Définition du agrandissement :

$$\overline{\gamma} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$$

32 Une éraflure sur l'objectif

DÉMARCHES DIFFÉRENCIÉES

Un astronome observe une étoile à travers une lunette afocale dont l'objectif a été rayé lors de son nettoyage.

Données :
- *l'objectif est une lentille convergente de distance focale 8,0 m et de diamètre 1,2 m ;*
- *l'oculaire de distance focale 1,0 cm et de diamètre 2,0 cm ;*
- *l'éraflure mesure 2,8 mm de long et se situe à l'extérieur de l'objectif à 10 cm de son centre optique.*

DÉMARCHE EXPERTE

L'astronome peut-il être perturbé par l'éraflure sur l'objectif lorsqu'il observe un astre ?

DÉMARCHE AVANCÉE

1. Déterminer la position de l'image donnée par la lunette de l'éraflure.
2. Où se forme l'image de l'étoile ? Justifier.
3. Est-il possible que l'astronome observe simultanément dans l'oculaire une image nette de l'étoile et de l'éraflure ?

33 Mesure de distance avec une lunette

Une lunette ($f'_{objectif}$ = 20 cm et $f_{oculaire}$ = 40 mm) astronomique est équipée d'un micromètre placé dans le plan focal objet de l'oculaire. Il s'agit d'une plaque de verre sur laquelle sont gravés des traits fins équidistants de 100 µm.



Image vue à l'œil nu



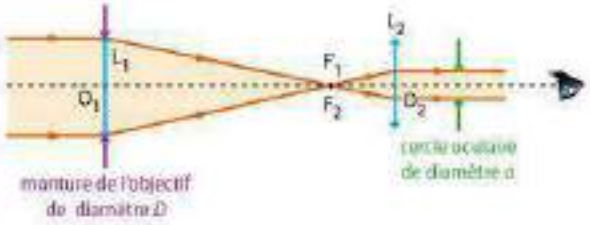
Image vue à travers la lunette

1. Quelle doit être la distance entre l'objectif et l'oculaire pour qu'un œil sans défaut observe simultanément une image nette du micromètre et d'un objet éloigné à travers la lunette ?
2. a. Calculer alors la valeur du grossissement.
b. Montrer que l'observation ci-dessous permet de vérifier la valeur du grossissement.
3. L'image d'un immeuble de hauteur h = 15 m couvre 14 divisions du micromètre.
a. Calculer la dimension de l'image intermédiaire.
b. En déduire la distance qui sépare l'immeuble du lieu d'observation.

34 Cercle oculaire et grossissement

Le schéma ci-dessous représente le trajet d'un faisceau lumineux qui traverse une lunette avec une direction parallèle à l'axe optique.

Données : *le diamètre de la pupille d'un œil dans l'obscurité est estimée à 6 mm ; l'objectif utilisé a un diamètre de 9,0 cm et une distance focale de 60 cm.*



1. Expliquer pourquoi on qualifie la lunette astronomique de collecteur de lumière.
2. Dans le cas d'une lunette afocale, on peut relier le diamètre du cercle oculaire avec le grossissement.
a. En appliquant le théorème de Thalès, montrer que le grossissement peut s'écrire : $G = \frac{D}{d}$.
b. Quel est le grossissement minimal nécessaire pour que toute la lumière en provenance de l'astre observé pénètre dans l'œil après la traversée de la lunette.
c. En déduire la distance focale de l'oculaire qu'il faut utiliser.

À L'ORAL

35 Luminosité

Élaborer un court exposé oral pour expliquer le choix de la distance focale de l'oculaire lorsqu'on souhaite observer un astre peu lumineux en présentant :
- la réalisation expérimentale sur banc d'optique d'une lunette afocale ;
- le compromis à trouver entre grossissement et luminosité.

Les mots-clés à utiliser

- objectif
- oculaire
- grossissement
- cercle oculaire
- collecteur de lumière

36 RETOUR SUR LA PAGE D'OUVERTURE

L'observation des objets lointains nécessite l'utilisation d'instruments d'optique particulier comme la lunette astronomique

Préparer un exposé oral qui explique le principe de fonctionnement de la lunette astronomique.



Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Développer ses compétences

37 La première photographie d'étoile

RÉSOLUTION DE PROBLÈME

50 min



ANALYSER Proposer une stratégie de résolution

L'observatoire du Harvard College aux États-Unis, s'est doté en 1847 d'une lunette dont l'objectif a un diamètre de 38,0 cm et une distance focale de 6,80 m. Il s'agissait d'un instrument remarquable pour l'époque au point de rester célèbre sous le nom de « Grand réfracteur ». Cet instrument a permis de réaliser la première photographie stellaire par Bond et Whipple : il s'agissait d'un daguerréotype de l'étoile Véga (principale étoile de la constellation de la Lyre).

Les premiers clichés du ciel profond et plus précisément de la grande nébuleuse d'Orion datent des années 1880.

DOC 1 La constellation d'Orion

Le corps d'Orion est facilement visible, marqué par quatre étoiles brillantes qui sont Bételgeuse (α Ori), Rigel (β Ori), Bellatrix (γ Ori) et Saïph (κ Ori). Les deux plus brillantes sont nettement colorées : Bételgeuse est rouge et Rigel est bleue.

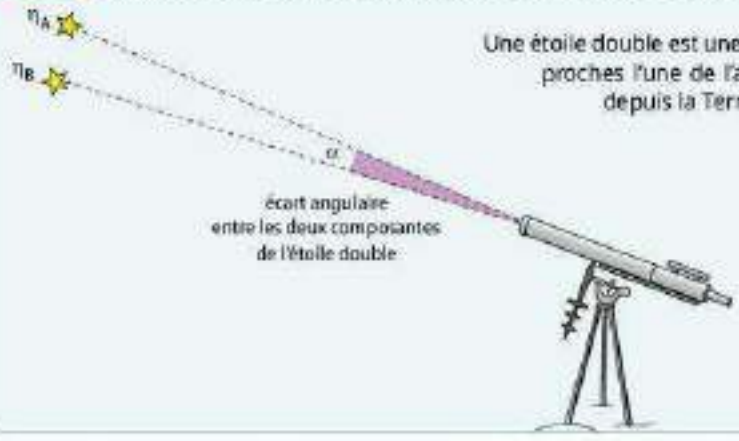
Au centre du corps, trois étoiles (δ, ε et ζ), quasi parfaitement alignées, constituent la ceinture d'Orion. Sous cet alignement, on aperçoit l'épée d'Orion, qui se termine sur ι Ori en passant par θ Ori, autour de laquelle est centrée la nébuleuse M 42, visible à l'œil nu.

La constellation d'Orion compte également une centaine d'étoiles doubles séparées de 1" à 50" d'arc.

L'étoile double η Ori est un véritable test du pouvoir séparateur des instruments d'optique car les deux étoiles η_A et η_B qui la composent ne sont séparées que de 1,4" d'arc.



DOC 2 Séparation des composantes d'une étoile double à l'aide d'une lunette



Une étoile double est une paire d'étoiles qui apparaissent comme proches l'une de l'autre dans le ciel lorsqu'on les observe depuis la Terre, à travers un instrument d'optique.

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Réaliser un schéma optique de la lunette qui vise l'étoile double η Ori et construire la marche d'un rayon lumineux issu de η_B qui émerge de l'oculaire en formant un angle α' avec l'axe optique de la lunette.
2. Exprimer le grossissement G de la lunette en fonction des distances focales de l'objectif et de l'oculaire.

PROBLÉMATIQUE

La lunette de l'observatoire de Harvard permet-elle de séparer le système d'étoile double η Ori dans la constellation d'Orion lorsqu'on utilise un oculaire de 4,0 cm ?

Toute prise d'initiatives et de présentation de la démarche suivie sera valorisée même s'il elle n'a pas abouti.

38 Photographier la Lune

ANALYSE ET SYNTHÈSE DE DOCUMENTS

50 min

COM Présenter une démarche de manière argumentée, synthétique et cohérente

L'astrophotographie est une des nombreuses disciplines de l'astronomie qui consiste à prendre des photographies du ciel. On peut par exemple utiliser un appareil photographique numérique que l'on fixe sur l'oculaire de la lunette.

DOC 1 Les instruments utilisés

La lunette est équipée d'un objectif de diamètre 110 mm, de distance focale 1 650 mm et d'oculaires de distances focales 4, 9, 18 et 33 mm.

L'appareil photographique numérique possède un objectif de distance focale 135 mm. Son capteur a pour dimensions : 22,3 mm × 14,9 mm



DOC 2 Clichés réalisés à l'aide de la lunette et de l'appareil photographique

Photographie de la Lune

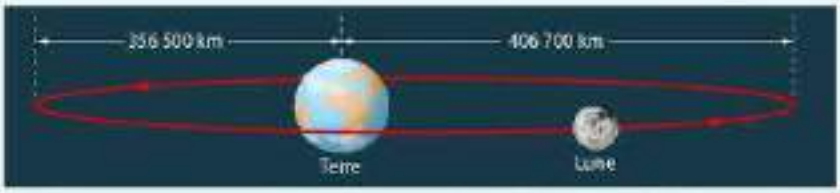


Détails observés avec un grossissement de ×183



DOC 3 Trajectoire de la lune

La Lune, de diamètre 3 474 km, se déplace sur une orbite elliptique dont la Terre est l'un des foyers. La distance de la Terre à la Lune varie donc régulièrement suivant sa position :



Lorsque la Lune est au plus près de la Terre, on dit qu'elle est au périgée, lorsqu'elle est au plus loin elle est à l'apogée.

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Déterminer la valeur de l'angle sous lequel nous apparait la Lune lorsqu'elle se trouve à l'apogée de son orbite autour de la Terre.
2. a. Calculer la taille de l'image de la Lune formée sur le capteur de l'appareil photographique après traversée de la lunette avec l'oculaire de plus grande distance focale.
   b. Est-il possible de réaliser une photographie de la Lune complète avec l'un des oculaires disponibles ?
3. a. Calculer la taille de l'image intermédiaire donnée de la Lune par l'objectif de la lunette lorsque l'astre est au périgée puis à l'apogée de sa trajectoire.
   b. Où faut-il placer le capteur de l'appareil photographique pour pouvoir y former l'image complète de la Lune ?

PROBLÉMATIQUE

Rédiger une synthèse qui rende compte des meilleures conditions expérimentales pour réaliser des photographies de l'astre lunaire. Préciser le réglage de l'association lunette - appareil photo en fonction de l'observation souhaitée.

Toute prise d'initiatives et de présentation de la démarche suivie sera valorisée même s'il elle n'a pas abouti.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

39 Observations terrestre

EXERCICE TYPE BAC

50 min

S'EN Présenter une démarche de manière argumentée, synthétique et cohérente

Une lunette astronomique peut être transformée en lunette terrestre en interposant entre l'objectif et l'oculaire une troisième lentille appelée véhicule.

Pour comprendre l'intérêt de ce dispositif, on modélise cette lunette à l'aide d'un objectif L_1 de distance focale $f'_1 = 10$ cm, d'un oculaire L_2 de distance focale $f'_2 = 2{,}0$ cm et d'un véhicule L_V de distance focale $f'_V = 2{,}0$ cm.

On observe à travers à travers la lunette un objet AB suffisamment éloigné pour pouvoir considérer qu'il est à l'infini.

Données : *La Tour Montparnasse, haute de 210 m, est située à 6 km de la Tour Eiffel.*



Pour une observation sans fatigue, l'image finale A'B' doit se trouver à l'infini.

1. Sur un schéma, à l'échelle 1/1, construire l'image intermédiaire A_1B_1 donnée par l'objectif L_1.

2. Le véhicule est placé à 14 cm de l'objectif de telle façon qu'il donne de l'image intermédiaire A_1B_1 une image A_VB_V de même taille que A_1B_1 mais renversée par rapport à A_1B_1.

a. Positionner la lentille L_V sur le schéma précédent et représenter l'image A_VB_V.

b. Vérifier graphiquement que le grandissement $\overline{\gamma}$ du véhicule vaut effectivement – 1.

c. Positionner, à l'échelle 1/1, la lentille L_2 sur le schéma précédent et construire l'image définitive A'B' donnée par la lentille L_2.

3. Justifier l'intérêt d'ajouter la lentille véhicule pour l'observation d'objets situés à la surface de la Terre alors que cela n'est pas nécessaire lorsqu'on observe un astre.

4. a. Déterminer l'expression du grossissement $\vec{G}$ de cette lunette et calculer sa valeur.

b. Calculer l'angle sous lequel on verrait la Tour Montparnasse à travers cette lunette située au deuxième étage de la Tour Eiffel.

VERS LE SUP'

40 Visée d'objets proches



Une lunette de visée est un instrument de mesure couramment utilisé en travaux pratiques. Elle est constituée de :

- un objectif L_1 de distance focale $f'_1 = 12{,}0$ cm ;
- un réticule en croix ;
- un oculaire L_2 de distance focale $f'_2 = 1{,}0$ cm situé à une distance d du réticule.

1. a. Quelle doit-être la position du réticule par rapport à l'oculaire pour que l'utilisateur à vue normale puisse observer sans effort le réticule à travers l'oculaire ?

b. Le réglage de la lunette nécessite l'observation sans fatigue de l'image nette d'un objet situé à l'infini. Quelle est la distance objectif-oculaire dans ce cas ?

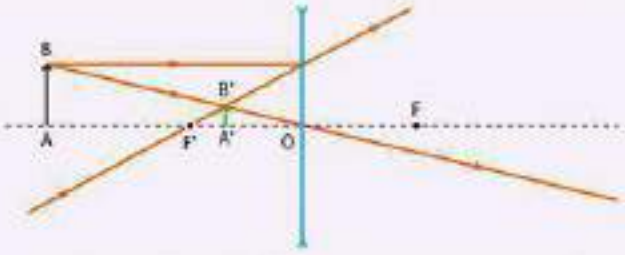
c. Faut-il augmenter ou diminuer le tirage (distance objectif-oculaire) pour observer un objet AB situé à une distance finie (supérieure à f'_1) de l'objectif ?

2. a. Le tirage de la lunette étant réglé à 18 cm, calculer la distance qui doit séparer l'objet visé de l'objectif.

b. Cette distance varie-t-elle si l'observateur souffre de myopie.

c. Expliquer pourquoi la lunette ainsi réglée est appelée « viseur à frontale fixe ».

Une lentille divergente donne d'un objet réel une image virtuelle car son foyer image est situé avant la lentille (voir schéma ci-après).



Sa distance focale $f' = \overline{OF'}$ est alors négative et la détermination de sa valeur est plus complexe que dans le cas d'une lentille convergente. L'utilisation d'un viseur est alors intéressante.

mesure 1 : À l'aide du viseur précédemment réglé, on vise l'objet AB et on note la position $x_A = 41{,}0$ cm du viseur.

mesure 2 : On place la lentille divergente après l'objet et on vise son centre O à l'aide d'une marque tracée sur le verre : il faut alors positionner le viseur sur la graduation $x_O = 51{,}0$ cm.

mesure 3 : En déplaçant encore le viseur, on observe l'image A'B' donnée par la lentille : il faut avancer le viseur jusqu'à la graduation $x'_A = 44{,}3$ cm.

3. a. Quelle distance sépare l'objet AB du viseur lors de la première mesure ?

b. Exploiter les résultats des mesures pour déterminer les valeurs de $\overline{OA}$ et $\overline{OA'}$.

c. En déduire la valeur de la distance focale f' de la lentille divergente étudiée.

GESTE ECE n° 8

Flash PAGE vidéo

Caractéristiques d'une lunette astronomique

Contexte

L'objectif est de modéliser une lunette astronomique et d'en déterminer le grossissement.

Documents mis à disposition

Pouvoir séparateur de l'œil



Il vaut environ une minute d'arc (1' = 1/60° = 0,017°)

Grossissement d'un instrument d'optique

angle sous lequel l'image définitive A'B' est vue à travers la lunette

grossissement (sans unité) $\rightarrow G = \frac{\theta'}{\theta}$ ← angle sous lequel l'objet AB est vu à l'œil nu

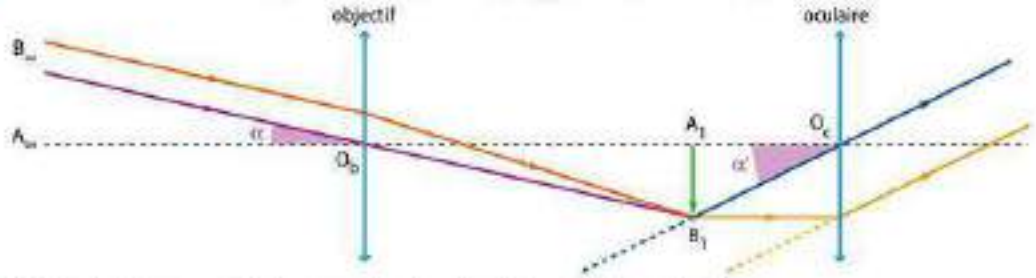
Matériel mis à disposition

- une calculette type « collège » ou un ordinateur avec fonction « calculatrice »
- un banc d'optique avec les cavaliers et supports adaptés
- deux lentilles convergentes de distances focales inconnues
- dispositif « objet à l'infini » de diamètre apparent $\alpha = -5 \times 10^{-2}$ rad
- un écran

Travail à effectuer

1. (ANA) **Proposition de protocole expérimental** *(20 min conseillées)*

1. Proposer une expérience permettant de déterminer la distance focale des deux lentilles à disposition.
2. Évaluer l'incertitude type liée à la méthode utilisée.
3. Sur le schéma suivant, faire apparaître le foyer image F'_{ob} de l'objectif et le foyer objet F_{oc} de l'oculaire.



4. En déduire la distance qui doit séparer les deux lentilles sur le banc d'optique.

Être en mesure de présenter le protocole

2. (RÉA) **Mise en œuvre du protocole expérimental proposé** *(30 min conseillées)*

1. Mettre en œuvre l'expérience proposée pour déterminer les distances focales des lentilles et identifier l'objectif et l'oculaire.
2. Sans toucher au réglage du dispositif « objet à l'infini », positionner l'objectif et l'oculaire de telle manière que la lunette modélisée soit afocale.
3. Rechercher la position de l'image intermédiaire A_1B_1 sur un écran et réaliser les mesures nécessaires pour calculer la valeur de l'angle α' sous lequel l'image définitive A'B' est vue à travers la lunette.

Être en mesure de présenter le montage expérimental attendu

3. (VAL) **Exploitation du résultat obtenu** *(10 min conseillées)*

- Cette lunette permettrait-elle de distinguer deux étoiles séparées d'une distance angulaire de 0,5 minute d'angle ?

Défaire le montage et ranger la paillasse.

PISTE POUR LE GRAND ORAL PRÉPA BAC

Pour se préparer à l'Oral
➥ Livret LES CLÉS DU BAC
(en début de manuel)

UNE QUESTION

Comment observer... l'infini ?

Enjeu de la question

La lunette astronomique et le télescope sont des instruments qui servent à observer le ciel et l'univers bien qu'ils soient tous les deux destinés à observer les astres à des distances très lointaines.

Proposition de plan de présentation

1. Comparaison du fonctionnement de ces deux instruments d'observation.
2. Difficultés de réglage : la lumière et les effets de pollution.
3. Contrainte technique à la valeur du grossissement.
4. Conclusion : le choix de l'instrument dépend de l'astre à observer.

Les mots-clés

lentilles convergentes ▸ miroirs ▸ réflexion ▸ réfraction ▸ luminosité ▸ diamètre de l'objectif

Exemple de support de présentation

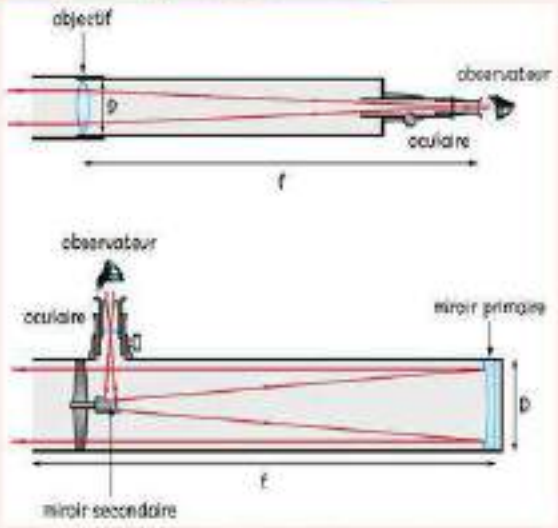


Schéma des deux instruments

QUESTIONS D'APPROFONDISSEMENT POSSIBLES



UN EXEMPLE DE PROJET PROFESSIONNEL

Espace, médecine, lunetterie, photographie, contrôle de la pollution... Autant de secteurs où **le technicien en optique de précision** peut trouver sa place. Avec le chercheur ou l'ingénieur, il participe à la conception et à la réalisation d'instruments d'optique de haute technologie. Son travail peut inclure le montage et le réglage des composants. En dépit de l'évolution des techniques de robotisation, la minutie et le souci du détail sont des qualités nécessaires pour devenir technicien en optique.

Le technicien en optique de précision est amené à travailler dans des entreprises qui fabriquent des composants élémentaires ou des équipements de mesure et d'analyse. Le secteur de l'optique se développe et recrute des jeunes diplômés pour des postes d'ingénieurs et de techniciens supérieurs.



Après le bac : *Bac + 3 licence pro métiers de l'électronique : microélectronique, optronique, licence pro optique professionnelle. Bac + 5 diplôme d'ingénieur ou master du domaine de l'optique.*
Autres métiers : *ingénieur·e opticien·ne, technicien·ne en optique de précision*

Description de la lumière

Avant d'aborder le chapitre EN AUTONOMIE

LES ACQUIS INDISPENSABLES

1re Enseignement de spécialité

- La lumière peut être décrite par deux modèles :
– un modèle **ondulatoire** où la lumière est une onde électromagnétique ;
– un modèle **particulaire** où la lumière est constituée de particules appelées photons.

Les deux modèles coexistent : on parle de **dualité onde-particule.**

- Une radiation de fréquence ν ou de longueur d'onde dans le vide λ est un ensemble de photons transportant chacun l'énergie E telle que :

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$$

h : la constante de Planck, $h = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J · s
E : énergie du photon (en J)
ν : fréquence (en Hz)
c : célérité de la lumière dans le vide, $c = 3{,}00 \times 10^{8}$ m · s^{-1}
λ : longueur d'onde (en m)

- L'énergie de l'atome est quantifiée : elle ne peut prendre que certaines valeurs.

Un atome peut absorber un photon si l'énergie du photon correspond à l'écart entre deux niveaux.

Un atome dans un état excité (après une décharge électrique, un chauffage, une absorption de lumière etc.) peut restituer de l'énergie en émettant un photon.

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

Pour chaque situation, rédiger une réponse qui explique en quelques lignes le raisonnement.



SITUATION 1

On dit que la lumière est onde et particule.

Décrire ces deux aspects de la lumière.

SITUATION 2

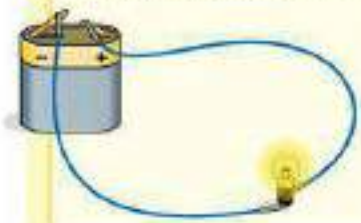
Les valeurs de l'énergie de l'hydrogène sont indiquées sur le diagramme suivant.



Recopier le diagramme et représenter l'émission d'un photon en précisant son énergie.

SITUATION 3

On souhaite mesurer la puissance électrique utilisée par une lampe et l'éclairement émis.



Indiquer quels instruments de mesure on va utiliser et comment les utiliser.



CHAPITRE

19

PHYSIQUE

par un flux de photons

En quoi la découverte et l'interprétation de l'effet photoélectrique a ouvert la voie à la physique quantique et à la mise au point de dispositifs innovants comme les cellules photovoltaïques utilisées au début pour les satellites ?

→ EXERCICE 21



NOTIONS ET CONTENUS

- Le photon : énergie, vitesse, masse.
- Effet photoélectrique.
- Travail d'extraction.
- Absorption et émission de photons.
- Enjeux énergétiques : rendement d'une cellule photovoltaïque.

CAPACITÉS EXPÉRIMENTALES

- Déterminer le rendement d'une cellule photovoltaïque → Activité 4

1. ACTIVITÉ DE DÉCOUVERTE

CLASSE INVERSÉE

COMPÉTENCES :
APP Rechercher et organiser l'information utile
COM Utiliser un vocabulaire adapté

Effet photoélectrique

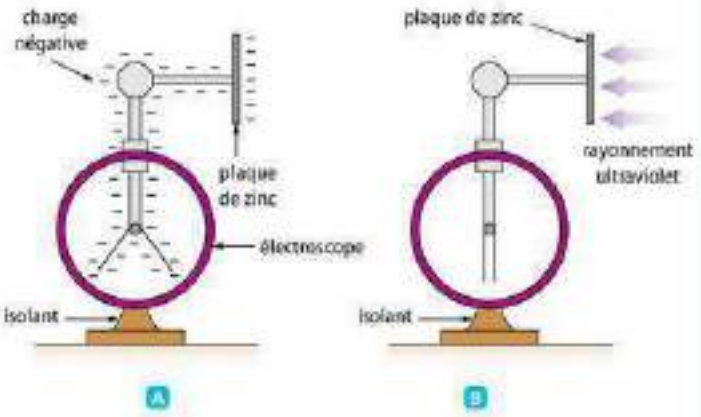
Les rayonnements peuvent extraire des électrons des matériaux. L'explication de ce phénomène a mis en évidence l'aspect particulaire de la lumière.

DOC 1 Expérience de Hertz et Hallwachs

En 1887 Heinrich Hertz (1857-1894) observe par hasard lors d'une expérience sur les ondes électromagnétiques, une influence de la lumière sur l'électricité. Avec son collaborateur, Wilhem Hallwachs (1859-1922), ils réalisent en 1888 le montage expérimental schématisé ci-contre.

Voici les résultats de leurs expériences :

- lorsque l'électroscope est chargé négativement et la plaque éclairée par un rayonnement ultraviolet, il se décharge ;
- lorsque l'électroscope est chargé positivement et la plaque éclairée par un rayonnement ultraviolet, il ne se passe rien ;
- lorsque l'électroscope est chargé négativement et la plaque éclairée par un rayonnement visible, il ne se passe rien.



DOC 2 Influences de la longueur d'onde et de l'intensité

Dans cette vidéo, on réalise une expérience de l'effet photoélectrique.

VIDÉO
Expérience de l'effet photoélectrique



DOC 3 Modèles ondulatoire et particulaire de la lumière

La lumière peut être décrite par deux modèles :

- un modèle **ondulatoire** où la lumière est une onde électromagnétique ;
- un modèle **particulaire** où la lumière est constituée de particules appelées photons d'énergie $E = h\nu$.

Les deux modèles coexistent : on parle de **dualité onde-particule**.

Dans le modèle ondulatoire, plus l'intensité augmente et plus l'énergie apportée par le rayonnement augmente. Dans le modèle particulaire, l'énergie apportée dépend de la fréquence ν du rayonnement et du nombre de photons.

Le modèle particulaire a été utilisé en 1905 par Albert Einstein (1879-1955), pour interpréter l'effet photoélectrique. Son interprétation a été récompensée par le prix Nobel de physique de 1921.

EXPLOITATION ET ANALYSE

1 Proposer une définition de l'effet photoélectrique.

2 a. Montrer que l'effet photoélectrique ne se produit qu'à partir d'une fréquence quelle que soit l'intensité du rayonnement incident.

b. Déterminer cette fréquence pour le zinc et sodium.

c. Interpréter les expériences de Hertz et Hallwachs.

3 Comment évolue le nombre d'électrons émis avec l'intensité du rayonnement incident ?

SYNTHÈSE

En vous basant sur les documents mis à disposition, expliquer pourquoi l'effet photoélectrique ne peut-être expliqué qu'en utilisant l'aspect particulaire de la lumière.

Je réussis si...

- **Je sais définir et citer les propriétés de l'effet photoélectrique.**

COMPÉTENCES :
APP Rechercher et organiser l'information utile
COM Utiliser un vocabulaire adapté et choisir des modèles de représentation appropriés

Applications de l'interaction lumière-matière

L'interaction lumière-matière est exploitée dans de nombreux dispositifs.

DOC 1 Dispositifs qui exploitent l'interaction lumière-matière

A diode électroluminescente



B spectromètre et spectrophotomètre



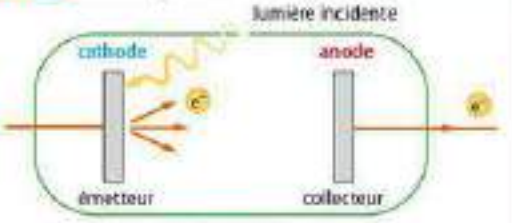
C détecteur de présence



D panneau photovoltaïque



DOC 2 Cellule photoélectrique

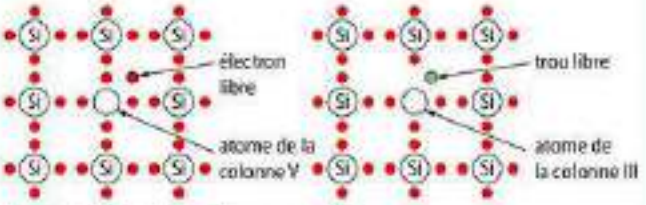


Constitution d'une cellule photoélectrique

Une cellule photoélectrique est constituée d'une anode et une cathode placées dans un tube vide ou rempli d'un gaz inerte. Elle est placée dans un circuit électrique. On exploite l'effet photoélectrique à la cathode, ce qui provoque un courant électrique dans le circuit. Le courant électrique augmente avec l'intensité du rayonnement. Les cellules photoélectriques sont souvent utilisées dans les dispositifs « tout ou rien » ou dans les capteurs de lumière.

DOC 3 Jonction PN

Une jonction PN est la jonction d'un semi-conducteur dopé N (pour négatif) qui contient un excès d'électrons et un semi-conducteur dopé P (pour positif) présentant un déficit d'électrons qui est équivalent à la présence de « trous ». Si cette jonction reçoit une énergie supérieure à une énergie minimale elle engendre un courant électrique. Pour le silicium par exemple cette énergie est de 1,12 eV. Lorsqu'on impose une tension supérieure à une tension minimale aux bornes de la jonction, la recombinaison d'une paire électron-trou engendre l'émission d'un rayonnement. Les valeurs de l'énergie minimale et de la tension minimale dépendent des matériaux utilisés.



Exemple de jonction PN avec du silicium

DONNÉES

- $h = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J · S, $c = 3{,}00 \times 10^{8}$ m · s^{-1}, 1 eV = $1{,}602 \times 10^{-19}$ J.

EXPLOITATION ET ANALYSE

1 a. Expliquer comment l'effet photoélectrique à la cathode peut provoquer un courant électrique dans le circuit comprenant la cellule photoélectrique.

b. Déterminer en justifiant le signe de l'anode et celui de la cathode.

2 Déterminer l'intervalle de longueurs d'onde des rayonnements qui peuvent provoquer un courant électrique dans la jonction PN en silicium.

3 Une jonction PN polarisée émet un rayonnement de longueur d'onde 560 nm. Calculer l'énergie d'un photon émis.

SYNTHÈSE

En effectuant éventuellement une recherche documentaire :

a. attribuer pour chaque dispositif du doc. 1 le principe qu'il exploite parmi :

- **l'effet photoélectrique ;**
- **absorption de photon par une jonction PN ;**
- **émission de photon par une jonction PN.**

b. choisir un dispositif du doc. 1 et détailler son fonctionnement.

Je réussis si...

- **Je sais expliquer qualitativement le fonctionnement d'une cellule photoélectrique.**
- **Je sais analyser le fonctionnement de dispositifs qui exploitent l'interaction lumière-matière.**

TP

COMPÉTENCES :
REA Mettre en œuvre un protocole expérimental
VAL Interpréter des mesures

Rendement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque convertit l'énergie lumineuse en énergie électrique. Le rendement permet de quantifier cette conversion d'énergie.

DOC 1 Cellule photovoltaïque



Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui exploite les propriétés des semi-conducteurs pour convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique. Assemblées en panneau photovoltaïque, elles permettent de produire de l'électricité. Le rendement des panneaux n'est pas très élevé mais ils ont l'avantage d'exploiter le Soleil, une source d'énergie renouvelable, et sont très pratiques dans les lieux isolés.

DOC 2 Matériel expérimental



DOC 3 Caractéristique d'une cellule

Pour construire la caractéristique $I = f(U)$ d'une cellule photovoltaïque pour un éclairement E, avec I l'intensité du courant dans le circuit qui comprend la cellule et U la tension aux bornes de la cellule, on utilise le matériel suivant :

- une **cellule photovoltaïque** de surface S ;
- un **voltmètre** ;
- un **ampèremètre** ;
- un **luxmètre** qui mesure l'éclairement E reçu par une surface en lux de symbole lx ;
- une **lampe de bureau** ;
- une **résistance** R variable de 0 à 100 kΩ, qui branchée en série avec la cellule, permet de faire varier I.

DOC 4 Rendement

Le rendement η d'une cellule photovoltaïque en pourcentage se calcule ainsi :

$$\eta = \frac{P_{\text{électrique}}}{P_{\text{lumineuse}}} \times 100$$

avec η sans unité et P la puissance en watt.

La puissance électrique $P_{\text{électrique}}$ est la puissance électrique maximale obtenue.

La puissance lumineuse se calcule : $P_{\text{lumineuse}} = ES$ avec E l'éclairement en $W \cdot m^{-2}$ et S la surface de la cellule en m^2. On admettra qu'un éclairement de 100 lux (mesuré à l'aide d'un luxmètre) correspond à $1\ W \cdot m^{-2}$.

EXPLOITATION ET ANALYSE

1 Tracé de la caractéristique

a. Proposer le schéma du montage expérimental permettant de tracer la courbe $I = f(U)$ pour la cellule photovoltaïque éclairée par une source de lumière d'éclairement E.

b. À l'aide d'un tableur grapheur, tracer $I = f(U)$.

2 Détermination de la puissance électrique

a. Calculer la puissance pour chaque couple de valeurs (I, U).

b. À l'aide d'un tableur grapheur, tracer $P = f(U)$.

c. Déterminer la puissance électrique maximale $P_{\text{électrique}}$.

3 Détermination de la puissance lumineuse

a. Mesurer l'éclairement E reçu par la cellule.

b. Calculer la puissance lumineuse $P_{\text{lumineuse}}$ reçue par la cellule photovoltaïque.

SYNTHÈSE

Calculer le rendement de la cellule photovoltaïque et commenter le résultat obtenu.

Avoir un regard critique sur les incertitudes de mesures. FICHE MÉTHODE ➥ p. 538

Je réussis si...

- **Je sais proposer un protocole expérimental pour tracer la caractéristique d'une cellule photovoltaïque.**
- **Je sais calculer le rendement d'une cellule photovoltaïque à partir de la caractéristique.**

1 Propriétés de l'effet photoélectrique

Découverte de l'effet photoélectrique

L'effet photoélectrique est observé et présenté en 1839 par Antoine-César et Edmond Becquerel : ils détectent un courant électrique entre deux électrodes d'un même métal plongées dans une solution lorsque l'une des deux électrodes est éclairée par la lumière du Soleil. Cet effet a ensuite été étudié précisément en 1887 par Heinrich Hertz (1857-1894), physicien allemand, sans qu'il ne parvienne à interpréter toutes ses propriétés.

L'**effet photoélectrique** est l'émission d'électrons d'un matériau sous l'effet d'un rayonnement électromagnétique (FIG. 1).

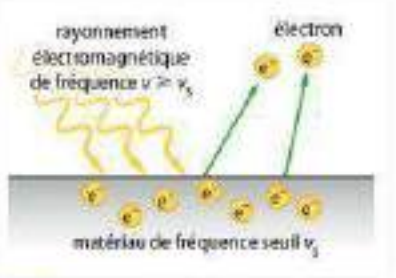


FIG. 1 Principe de l'effet photoélectrique.

Propriétés

On constate expérimentalement que :
- l'émission d'électrons se produit à partir d'une fréquence limite appelée fréquence seuil qui dépend du matériau étudié mais pas de l'intensité du rayonnement ;
- le nombre d'électrons émis est proportionnel à l'intensité du rayonnement ;
- l'énergie cinétique de l'électron émis est proportionnelle à la fréquence du rayonnement.

L'**effet photoélectrique** se produit à partir d'une **fréquence seuil**, noté ν_s, quelle que soit l'intensité du rayonnement. La fréquence seuil dépend du matériau étudié (FIG. 2).

Matériau	ν_s	λ_s
Césium	$4{,}62 \times 10^{14}$ Hz	650 nm
Potassium	$5{,}56 \times 10^{14}$ Hz	540 nm
Baryum	$6{,}00 \times 10^{14}$ Hz	500 nm
Zinc	$8{,}11 \times 10^{14}$ Hz	370 nm
Cuivre	$1{,}03 \times 10^{15}$ Hz	290 nm

FIG. 2 Fréquences et longueurs d'onde seuil de différents matériaux.

Remarque. On peut associer à chaque fréquence seuil une longueur d'onde seuil dans le vide en utilisant la relation $\lambda_s = c/\nu_s$, avec c la célérité de la lumière dans le vide : $c = 3{,}00 \times 10^8$ **m · s^{-1}**. L'effet photoélectrique se manifeste pour un rayonnement de longueur d'onde inférieure à la longueur d'onde seuil.

EXEMPLE

La fréquence seuil du zinc vaut $\nu_s = 8{,}11 \times 10^{14}$ **Hz** et la longueur d'onde dans le vide associée est $\lambda_s = 370$ **nm**. Un rayonnement de fréquence supérieure à $8{,}11 \times 10^{14}$ **Hz** et de longueur d'onde dans le vide inférieure à 370 **nm** provoque l'effet photoélectrique.

Interprétation

Le modèle ondulatoire de la lumière ne permet pas d'expliquer l'existence d'une fréquence seuil et l'absence d'intensité lumineuse seuil.

Pour interpréter cela, Albert Einstein (1879-1955), physicien allemand, reprend en 1905 le modèle particulaire de la lumière abandonné à l'époque en faveur du modèle ondulatoire. Il l'associe à l'hypothèse de quantification de l'énergie émise par Max Planck (1858-1947) (FIG. 3).



FIG. 3 Albert Einstein reçoit la médaille Max Planck de ses mains le 28 juin 1929.

Ainsi un rayonnement de fréquence ν est un ensemble de photons, particules de masse nulle et de vitesse $c = 3{,}00 \times 10^8$ **m · s^{-1}** dans le vide, transportant chacun l'énergie $E = h\nu$. Si ce photon arrive sur un matériau de fréquence seuil ν_s :
- si $E_{photon} < h\nu_s$, aucun électron n'est émis du matériau ;
- si $E_{photon} \geq h\nu_s$, des électrons sont émis même pour un seul photon.

L'effet photoélectrique ne peut être interprété qu'en utilisant le modèle particulaire de la lumière : la lumière est un ensemble de **photons** (FIG. 4) d'énergie $E = h\nu$ avec h la constante de Planck $h = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J · s.
Si l'énergie des photons est supérieure ou égale à $h\nu_s$, la lumière ou le rayonnement électromagnétique extrait des électrons du matériau.

Nom : photon
Fonction : particule de lumière
Masse : $m = 0$ au repos
Charge : $q = 0$ C
Énergie : $E = h\nu$
Vitesse : $c = 3{,}00 \times 10^8$ m · s^{-1} dans le vide

FIG. 4 Caractéristiques du photon

2 Aspect énergétique

Travail d'extraction

L'effet photoélectrique se produit pour une fréquence seuil qui dépend du matériau. D'un point de vue énergétique, cela se traduit par l'existence d'un travail d'extraction de l'électron. Il est nécessaire de fournir une énergie minimale à un matériau pour en extraire un électron. Plus le travail d'extraction est important et plus l'électron est lié au matériau.

Le **travail d'extraction** est l'énergie minimale à fournir à un matériau pour en extraire un électron. Son symbole est W et son unité est le joule de symbole J.
On a la relation :

travail d'extraction (en J) → $W = h\nu_S$ ← fréquence (en Hz)
constante de Planck $h = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J · s

Le travail d'extraction dépend du matériau étudié.

Remarque. Les valeurs du travail d'extraction étant faibles, on utilise couramment comme unité l'électron-volt de symbole eV avec la conversion $1\ \text{eV} = 1{,}602 \times 10^{-19}$ J.

EXEMPLE

La fréquence seuil du zinc vaut $\nu_S = 8{,}11 \times 10^{14}$ **Hz**. Le travail d'extraction pour le zinc se calcule $W = h \times \nu_S = 6{,}63 \times 10^{-34} \times 8{,}11 \times 10^{14} = 5{,}38 \times 10^{-19}$ J $= 5{,}38 \times 10^{-19} / 1{,}602 \times 10^{-19} = 3{,}36$ **eV**. Si un photon possède une énergie supérieure ou égale à 3,36 **eV**, il peut extraire un électron du zinc.

Énergie cinétique de l'électron

Soit un rayonnement de fréquence ν qui éclaire un matériau de fréquence seuil ν_S tel que $\nu > \nu_S$. L'énergie du photon $E_{photon} = h\nu$ est supérieure au travail d'extraction $W = h\nu_S$. Un électron est donc extrait du matériau et possède une énergie cinétique E_c correspondant à l'énergie excédentaire. En effet la conservation de l'énergie implique :
$E_{photon} = W + E_c$ et $E_c = E_{photon} - W = h\nu - h\nu_S = h(\nu - \nu_S)$. L'énergie cinétique de l'électron augmente donc linéairement avec la fréquence du rayonnement.

Si un photon de fréquence ν extrait un électron d'un matériau de fréquence seuil ν_S telle que $\nu > \nu_S$, l'électron possède une **énergie cinétique** E_c telle que :

énergie du photon (en J) ; travail d'extraction (en J) ; fréquence (en Hz)
énergie cinétique de l'électron (en J) → $E_c = E_{photon} - W = h\nu - h\nu_S = h(\nu - \nu_S)$
constante de Planck $h = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J · s ; fréquence seuil (en Hz)

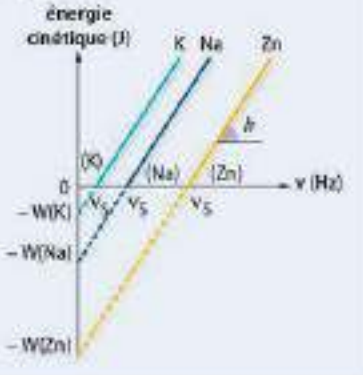
Remarque. On peut également calculer la vitesse de l'électron avec la relation $E_c = \frac{1}{2} m_e v^2$ donc $v = \sqrt{\frac{2E_c}{m_e}}$ avec m_e la masse de l'électron telle que $m_e = 9{,}11 \times 10^{-31}$ kg.

EXEMPLE

Un rayonnement de fréquence $\nu = 10{,}0 \times 10^{14}$ **Hz** éclaire le zinc de travail d'extraction $W = 5{,}38 \times 10^{-19}$ J, l'énergie cinétique de l'électron extrait se calcule :
$E_c = E_{photon} - W = h\nu - W = 10{,}0 \times 10^{14} \times 6{,}63 \times 10^{-34} - 5{,}38 \times 10^{-19}$
$= 1{,}25 \times 10^{-19}$ J.
La vitesse de l'électron se calcule : $v = \sqrt{\frac{2E_c}{m_e}} = 5{,}24 \times 10^5$ **m · s⁻¹**.

UN PONT VERS LES MATHS

Le tracé de l'**énergie cinétique** de l'électron en fonction de la fréquence du rayonnement est une droite de coefficient directeur h, qui coupe l'axe des abscisses en ν_S et a pour ordonnée à l'origine $-W$.



3 Applications de l'interaction photon-matière

Cellule photoélectrique

Une cellule photoélectrique est constituée de deux électrodes : la cathode et l'anode enfermées dans un tube vide ou rempli d'un gaz inerte (FIG. 5). Lorsque la cellule est reliée à un circuit électrique comprenant une source de tension et que la cathode est éclairée par un rayonnement de fréquence supérieure à sa fréquence seuil, elle émet des électrons qui sont collectés à l'anode. Le courant électrique obtenu augmente avec le nombre de photon reçus donc l'intensité de la source de rayonnement.

Les cellules photoélectriques permettent ainsi de convertir un signal lumineux en signal électrique et sont utilisées :
- pour mesurer l'intensité lumineuse dans les luxmètres, les spectrophotomètres et les spectromètres (UV-Vi, IR) ;
- dans des dispositifs contrôlés par la lumière : interrupteurs crépusculaires, contrôle de présence d'un objet par un faisceau lumineux etc.

Une **cellule photoélectrique** est un dispositif qui engendre un courant électrique sous l'effet de la lumière. Ces cellules sont utilisées pour mesurer l'intensité lumineuse d'une source et comme capteur de lumière.

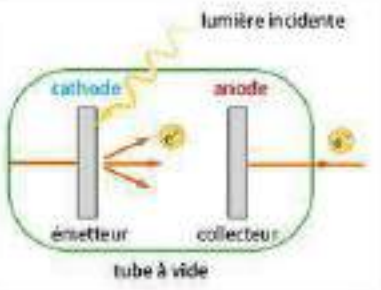


FIG. 5 Principe d'une cellule photo-électrique

Utilisation des semi-conducteurs

L'utilisation de matériaux semi-conducteurs en jonction PN (FIG. 6) et l'exploitation de l'effet photoélectrique a permis la mise au point de nombreux dispositifs comme les cellules photovoltaïques et des diodes électroluminescentes (DEL). Dans les deux cas, les niveaux d'énergie des matériaux sont représentés par des bandes d'énergie (FIG. 7).

Si l'énergie d'un photon est supérieure à une énergie appelée « énergie du gap » un électron est extrait ce qui engendre un courant électrique. C'est ainsi que les cellules photovoltaïques convertissent l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Le rendement d'une cellule photovoltaïque mesure l'efficacité de la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique. Il dépend de la technologie et se situe actuellement entre 5 et 18 %.

Une **cellule photovoltaïque** est un dispositif qui convertit l'énergie lumineuse en énergie électrique et est utilisée pour la production d'électricité.
Le rendement η d'une cellule photovoltaïque se calcule :

$$\eta = \frac{E_{\text{utile}}}{E_{\text{fournie}}} = \frac{E_{\text{électrique}}}{E_{\text{lumineuse}}} \times 100$$

où $\eta = \dfrac{P_{\text{électrique}}}{P_{\text{lumineuse}}} \times 100$ η sans unité et E l'énergie en J,
P la puissance en W.

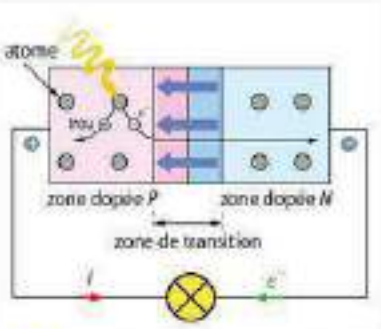


FIG. 6 Principe d'une cellule photovoltaïque

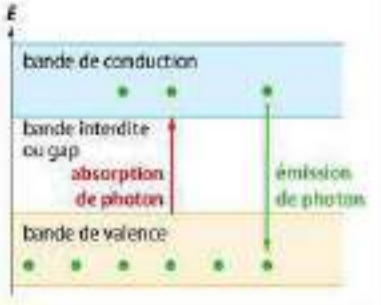


FIG. 7 Bandes d'énergies dans les matériaux utilisés dans les cellules photovoltaïques et les DEL. L'absorption de photon est exploitée dans les cellules photovoltaïques, l'émission dans les diodes électroluminescentes.

Pour déterminer expérimentalement le rendement, on éclaire la cellule photovoltaïque par une source de lumière de puissance $P_{\text{lumineuse}}$ puis on mesure la tension U aux bornes de la cellule pour différentes valeurs de l'intensité I. Le tracé de $I = f(U)$ et $P = f(U)$ permet de déterminer la puissance électrique maximale $P_{\text{électrique}}$ (FIG. 8).

Dans le cas d'une diode électroluminescente (notée DEL et de symbole ), on exploite également une jonction PN que l'on relie à une source de tension. Lorsque la DEL est polarisée en sens direct, un électron se recombine à un trou (lacune électronique) : cela libère de l'énergie sous forme d'émission de photon (FIG. 7).

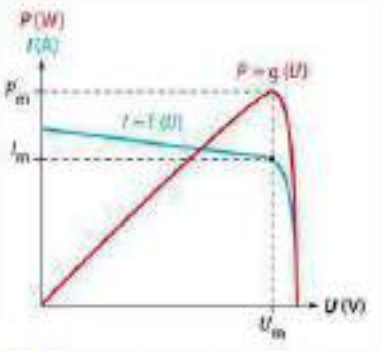


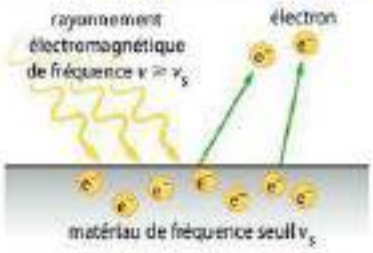
FIG. 8 Détermination de la puissance électrique maximale d'une cellule photovoltaïque.

Le vocabulaire à retenir
Les relations à connaître

FICHE MÉMO PRÉPA BAC

1 Propriétés de l'effet photoélectrique

Principe de l'effet photoélectrique



L'effet photoélectrique dépend de la **fréquence seuils ν_S**.
L'énergie cinétique de l'électron dépend la fréquence.

Interprétation en 1905 par Einstein qui utilise la notion de photon

Nom : photon
Fonction : particule de lumière
Masse : $m = 0$ au repos
Charge : $q = 0$ C
Énergie : $E = h\nu$
Vitesse : $c = 3{,}00 \times 10^8$ m · s^{-1} dans le vide

2 Aspect énergétique

Travail l'extraction d'un électron

travail d'extraction (J) → $W = h\nu_S$ ← fréquence (Hz)
constante de Planck $h = 6{,}63 \times 10^{-34}$ (J · s)

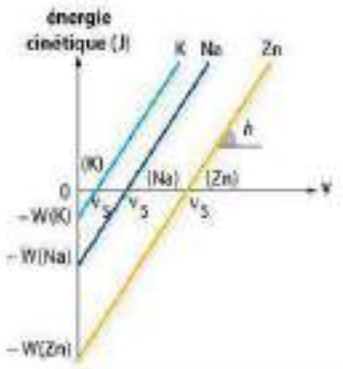
Conservation de l'énergie

énergie du photon (J) : $h\nu$
travail d'extraction (J) : W
fréquence (Hz) : ν

$$E_c = E_{photon} - W = h\nu - h\nu_S = h(\nu - \nu_S)$$

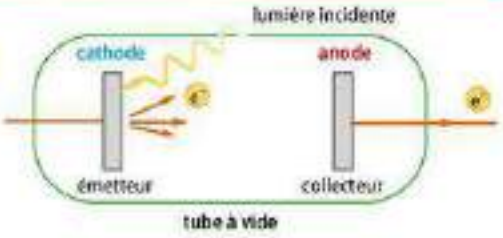
énergie cinétique de l'électron (J) : E_c
constante de Planck $h = 6{,}63 \times 10^{-34}$ (J · s) : h
fréquence seuil (Hz) : ν_S

Tracé de l'énergie cinétique de l'électron en fonction de la fréquence

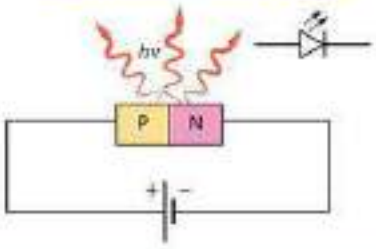


3 Applications de l'interaction photon-matière

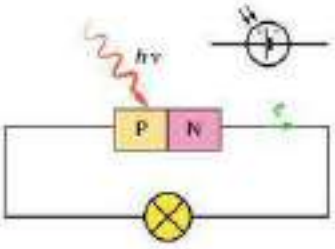
Cellule photoélectrique



DEL (diode électroluminescente)



Cellule photovoltaïque

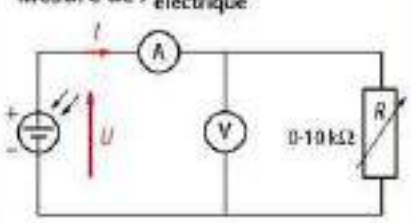


Rendement d'une cellule photovoltaïque

$$\eta = \frac{E_{utile}}{E_{fournie}} = \frac{E_{électrique}}{E_{lumineuse}} \times 100$$

$$\eta = \frac{P_{électrique}}{P_{lumineuse}} \times 100$$

Mesure de $P_{électrique}$



Vérifier l'essentiel EN AUTONOMIE

Pour chaque question, choisir la ou les bonnes réponses. ➡ SOLUTIONS EN PAGE 593

Flash PAGE corrigés détaillés

Flash PAGE QCM interactifs

DONNÉES

- Célérité de la lumière dans le vide $c = 3{,}00 \times 10^{8}\ \text{m s}^{-1}$; constante de Planck $h = 6{,}63 \times 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}$; $1\ \text{eV} = 1{,}602 \times 10^{-19}\ \text{J}$

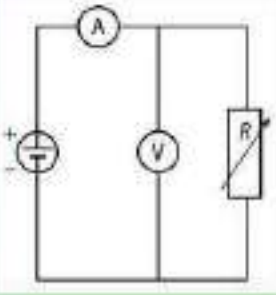
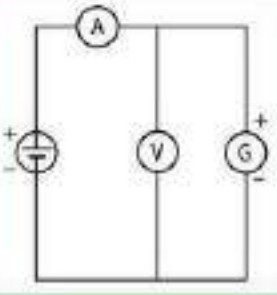
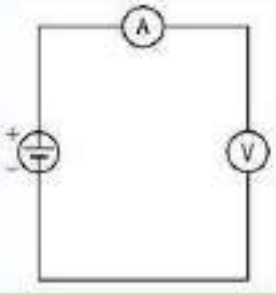
1 Propriétés de l'effet photoélectrique

	A	B	C
1 L'effet photoélectrique s'explique avec :	l'aspect particulaire de la lumière.	l'aspect ondulatoire de la lumière.	la dualité onde-particule de la lumière.
2 L'effet photoélectrique se produit :	en dessous d'une fréquence seuil.	au-dessus d'une fréquence seuil.	pour n'importe quelle fréquence.
3 Le cobalt a une fréquence seuil de $1{,}2 \times 10^{15}$ Hz. L'effet photoélectrique se produit :	pour une longueur d'onde dans le vide supérieure à 250 nm.	pour une longueur d'onde dans le vide inférieure à 250 nm.	pour une longueur d'onde dans le vide égale à 250 nm.

2 Aspect énergétique

	A	B	C
4 Le travail d'extraction est l'énergie :	à fournir pour extraire un photon.	à fournir pour extraire un électron.	libérée lors de l'extraction d'un électron.
5 Le cobalt a une fréquence seuil de $1{,}2 \times 10^{15}$ Hz. Le travail d'extraction vaut :	$8{,}0 \times 10^{-19}$ J.	$5{,}5 \times 10^{-40}$ J.	$1{,}7 \times 10^{-40}$ J.
6 La conservation de l'énergie dans le cas de l'effet photoélectrique s'écrit :	$h\nu = E_{\text{c électron}} + W$	$h\nu = E_{\text{c électron}} + h\nu_s$	$h\nu = E_{\text{c électron}} - W$

3 Applications de l'intéraction photon-matière

	A	B	C
7 Le(s) dispositif(s) qui exploite(nt) l'effet photoélectrique est(sont) :	la résistance.	le luxmètre.	le spectrophotomètre.
8 Le rendement d'une cellule photovoltaïque se calcule :	$\eta = \dfrac{P_{\text{lumineuse}}}{P_{\text{électrique}}} \times 100$	$\eta = \dfrac{E_{\text{lumineuse}}}{E_{\text{électrique}}} \times 100$	$\eta = \dfrac{P_{\text{électrique}}}{P_{\text{lumineuse}}} \times 100$
9 Pour mesurer la puissance électrique maximale fournie par une cellule photovoltaïque, on réalise le montage :			

Acquérir les bases

1 Propriétés de l'effet photoélectrique

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Effet photoélectrique
- Décrire l'effet photoélectrique, ses caractéristiques et son importance historique.
- Interpréter qualitativement l'effet photoélectrique à l'aide du modèle particulaire de la lumière.

→ Acquérir les bases : 11 → S'entraîner : 13

DONNÉES
- Célérité de la lumière dans le vide $c = 3{,}00 \times 10^{8}\ m \cdot s^{-1}$; constante de Planck $h = 6{,}63 \times 10^{-34}\ J \cdot s$
- $1\ eV = 1{,}602 \times 10^{-19}\ J$; $m_e = 9{,}11 \times 10^{-31}\ kg$.

10 Schéma

On trouve le schéma suivant sur un site internet traitant de l'effet photoélectrique.



$4{,}3 \times 10^{14}$ Hz $5{,}5 \times 10^{14}$ Hz $6{,}7 \times 10^{14}$ Hz

1. Pourquoi s'agit-il bien d'effet photoélectrique sur ce schéma ?

2. a. Définir ce qu'est la fréquence seuil.
b. Quelle information sur la fréquence seuil du matériau étudié peut-on extraire de ce document ?

11 Vrai ou faux

Dire si les affirmations suivantes sont vraies ou fausses.

1. L'effet photoélectrique se produit à partir d'une certaine fréquence.

2. L'effet photoélectrique se produit à partir d'une certaine intensité lumineuse.

3. L'effet photoélectrique est une interaction entre un photon et un électron.

4. Le modèle ondulatoire de la lumière ne permet pas d'expliquer l'effet photoélectrique.

12 Photon

Recopier et compléter la « carte d'identité » du photon ci-dessous.

Nom :
Définition :
Masse :
Expression de l'énergie :
Vitesse dans le vide :
Preuve expérimentale d'existence :

13 Onde ou particule

Attribuer à chaque affirmation suivante le modèle physique de la lumière utilisé.

a. À partir d'une certaine intensité du rayonnement incident, l'électron du matériau possède suffisamment d'énergie pour s'en extraire.

b. Plus l'intensité lumineuse est importante, plus il y a de photons donc plus il y a d'électrons extraits.

c. Un seul photon suffit pour extraire un électron si sa fréquence est suffisante.

d. L'énergie cinétique des électrons extraits est d'autant plus importante que l'intensité du rayonnement qui l'extrait est importante.

14 Électron ou non

Le schéma suivant indique les longueurs d'onde seuil de différents matériaux.



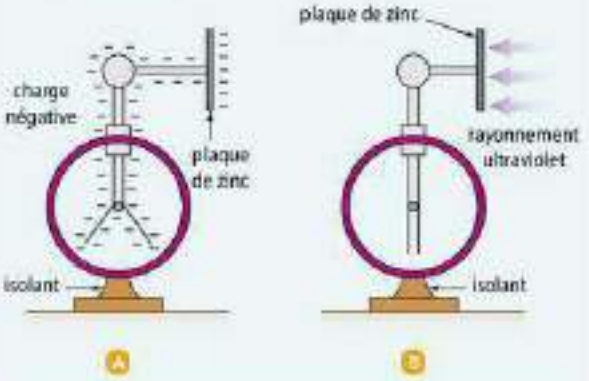
On éclaire ces matériaux avec les rayonnements suivants :
a. un rayonnement de longueur d'onde $\lambda = 500$ nm ;
b. un rayonnement de fréquence $\nu = 7{,}5 \times 10^{14}$ Hz ;
c. un rayonnement ultraviolet.

Indiquer pour chaque rayonnement sur quel matériau se produit un effet photoélectrique.

15 Expérience d'Hallwachs

HISTOIRE DES SCIENCES

En 1888, Wilhem Hallwachs (1859-1922), physicien allemand et collaborateur de Heinrich Hertz, réalise l'expérience schématisée ci-dessous.



Donnée : $\lambda_s(Zn) = 0{,}37\ \mu m$.

1. a. Donner la définition de l'effet photoélectrique.
b. Expliquer en quoi cette expérience est une démonstration de l'effet photoélectrique.

2. Observera-t-on un effet photoélectrique :
a. pour un rayonnement visible ;
b. si le dispositif est chargé positivement ?
Justifier les réponses en utilisant la donnée.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

2 Aspect énergétique

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

- Définir le travail d'extraction.
- Établir, par un bilan d'énergie, la relation entre l'énergie cinétique des électrons émis et la fréquence du rayonnement incident.

➥ Acquérir les bases : 17 ➥ S'entraîner : 17

16 Travail d'extraction

Soient les matériaux de seuil photoélectrique suivant.

Matériau	Fréquence seuil	Longueur d'onde seuil	Travail d'extraction
a. Argent (Ag)		0,27 µm	
b. Platine (Pt)	$4,5 \times 10^{14}$ Hz		
c. Césium (Cs)		0,19 µm	
d. Calcium (Ca)	$6,7 \times 10^{14}$ Hz		

1. a. Rappeler la définition, le symbole et l'unité du travail d'extraction.
b. Donner la relation entre le travail d'extraction et la fréquence seuil.
c. En déduire la relation entre le travail d'extraction et la longueur d'onde seuil.
2. Recopier et compléter le tableau ci-dessus.
3. Recopier et compléter les phrases suivantes.
- Plus la longueur d'onde seuil... et plus le travail d'extraction...
- Plus la fréquence seuil... et plus le travail d'extraction...

17 Laser bleu



Un laser bleu de longueur d'onde $\lambda = 450$ nm extrait un électron d'une électrode en césium de travail d'extraction 1,95 eV.

1. Calculer l'énergie cinétique de l'électron en J puis en eV.
2. Calculer la vitesse d'expulsion de l'électron.

18 Potassium

Soit un échantillon de potassium de travail d'extraction $W = 2,29$ eV. Il est éclairé par un rayonnement de fréquence $\nu = 6,0 \times 10^{14}$ Hz.

1. a. Rappeler la relation entre le travail d'extraction, la fréquence, du rayonnement et l'énergie cinétique de l'électron émis.
b. Quel principe utilise-t-on pour établir cette relation ?
2. a. Calculer l'énergie cinétique de l'électron
b. En déduire la vitesse de l'électron.

19 Énergie cinétique

Un rayonnement de fréquence ν extrait un électron d'un matériau de fréquence seuil ν_s. L'électron est éjecté avec une vitesse v.

1. Comparer ν et ν_s dans cette situation.
2. a. Donner la relation entre l'énergie du photon incident E_p, l'énergie cinétique de l'électron E_c et le travail d'extraction du matériau W en précisant la loi de conservation utilisée.
b. Exprimer alors E_c en fonction de ν et ν_s.
c. Représenter l'allure de la courbe $E_c = f(\nu)$.
d. Justifier que l'énergie cinétique de l'électron augmente linéairement avec la fréquence du rayonnement incident.

3 Applications de l'interaction photon-matière

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Interaction photon-matière
- Expliquer qualitativement le fonctionnement d'une cellule photoélectrique.
- Citer quelques applications actuelles mettant en jeu l'interaction photon-matière

➥ Acquérir les bases : 21 ➥ S'entraîner : 24

Rendement d'une cellule photovoltaïque
- Définir le rendement d'une cellule photovoltaïque
- Déterminer le rendement d'une cellule photovoltaïque

➥ Acquérir les bases : 23 ➥ S'entraîner : 24

20 Rendement

Un panneau photovoltaïque a un rendement de 11 %. Il reçoit un rayonnement de 900 W.

1. Représenter la conversion d'énergie qui a lieu dans un panneau photovoltaïque.
2. Rappeler la définition du rendement.
3. Calculer la puissance électrique produite.

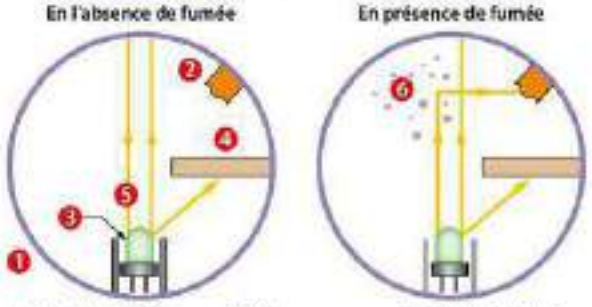
21 Cellule photoélectrique

Une cellule photoélectrique est constituée de deux électrodes : une anode et une cathode placées face à face dans une ampoule vide ou contenant un gaz inerte de basse pression. On éclaire la cathode avec un rayonnement de fréquence supérieure à sa fréquence seuil. Un courant électrique parcourt alors le circuit dans lequel elle se situe.

1. Faire un schéma de la cellule photoélectrique.
2. Expliquer comment le courant est créé à partir de l'éclairement de la cathode.
3. Préciser le signe de la cathode et le signe de l'anode.
4. Citer un exemple de dispositif qui exploite une cellule photoélectrique.

22 Détecteur de fumée

Le principe d'un détecteur de fumée est schématisé ainsi.



1 : chambre optique
2 : capteur de lumière
3 : DEL
4 : cache opaque
5 : rayon de lumière
6 : particules de fumée

1. a. Quel composant utilise l'effet photoélectrique ? Justifier
b. Quel composant utilise l'effet électroluminescent ?
2. a. Dans quel composant a-t-il absorption de photon ?
b. Dans quel composant y a-t-il émission de photon ?
3. Résumer le principe du détecteur de fumée.

23 Étude d'une cellule

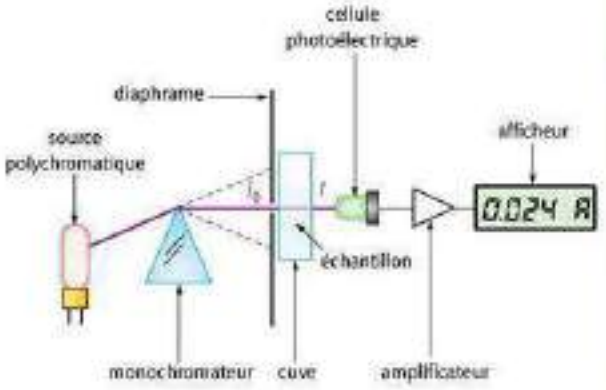
Lors d'une séance de TP, on éclaire une cellule photovoltaïque de longueur 5 cm et de largeur 4 cm avec une lampe de bureau placée à 10 cm de la cellule. La cellule reçoit un éclairement de 7 000 lx. On mesure $I = 0{,}18$ A et $U = 0{,}35$ V pour la puissance électrique maximale.

Données : *on admettra que 100 lx = 1 W · m^{-2} ; on a la relation $P_{lumineuse} = E \times S$ avec E l'éclairement en W · m^{-2} et S la surface de la cellule en m^2.*

1. Calculer la puissance lumineuse reçue.
2. Calculer la puissance électrique maximale.
3. a. Calculer le rendement de la cellule.
b. Commenter le résultat obtenu.

24 Spectrophotomètre

Un spectrophotomètre est utilisé pour mesurer l'absorbance dans le domaine du visible d'une solution colorée. Son principe simplifié est schématisé ci-dessous.



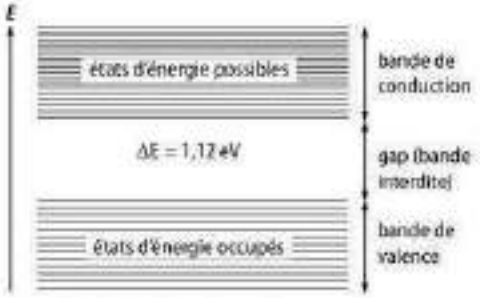
Données : *domaine du visible*



1. Quel élément convertit l'intensité lumineuse en électricité ?
2. Quel effet est exploité dans ce dispositif ?
3. Quelle condition doit respecter la longueur d'onde seuil de la cathode de la cellule ? Recopier en justifiant la réponse correcte parmi les réponses proposées ci-dessous :
a. $\lambda_S \leqslant 400$ nm b. $\lambda_S \leqslant 800$ nm c. $\lambda_S \geqslant 400$ nm

25 Le silicium

Le silicium est un semi-conducteur qui est exploité pour construire les diodes électroluminescentes et les cellules photovoltaïques. C'est un matériau qui devient conducteur lorsqu'on lui apporte une énergie supérieure à celle de la bande interdite appelée aussi « gap ». Cette énergie peut par exemple être apportée par un photon.



1. Quelle(s) analogie(s) peut-on faire entre ce principe et l'effet photoélectrique ?
2. Calculer les domaines de fréquence et de longueur d'onde des photons qui permettent de rendre le silicium conducteur.
3. Parmi les deux composants cités, lequel :
a. convertit l'énergie électrique en énergie lumineuse ?
b. convertit l'énergie lumineuse en énergie électrique ?

Faire le point avant d'aller plus loin

PRÉPA BAC

Pour vérifier ses connaissances, répondre aux questions suivantes (sans regarder le cours !)

Expliquer pourquoi l'effet photoélectrique ne s'explique qu'avec la notion de photon.

Citer deux dispositifs qui exploitent l'interaction photon-matière.

Définir l'effet photoélectrique et la fréquence seuil.

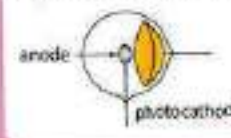
Définir le travail d'extraction, donner son symbole et son unité.

Donner la relation qui permet de calculer le rendement d'une cellule photovoltaïque en explicitant chaque grandeur et son unité.

Représenter le schéma du circuit électrique et décrire le protocole permettant de déterminer la puissance électrique maximale que peut fournir une cellule photovoltaïque éclairée par une source de lumière de puissance P_{lum}.

Établir, par un bilan d'énergie, la relation entre l'énergie cinétique des électrons émis et la fréquence du rayonnement incident.

Expliquer le fonctionnement de la cellule photoélectrique représentée ci-dessous.



Donner deux caractéristiques de l'effet photoélectrique.

Retrouver ces questions en version numérique

Flash PAGE cartes mémos

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Exercice résolu EN AUTONOMIE

26 Or électrique

L'effet photoélectrique se produit pour une fréquence seuil qui dépend du matériau. D'un point de vue énergétique, cela se traduit par l'existence d'un travail d'extraction de l'électron : l'énergie minimale à fournir à un matériau pour en extraire un électron. Le travail d'extraction pour l'or est de 5,10 eV.



Données : $c = 3{,}00 \times 10^8\ m\,s^{-1}$; $h = 6{,}63 \times 10^{-34}\ J \cdot s$; $eV = 1{,}602 \times 10^{-19}\ J$; $m_e = 9{,}11 \times 10^{-31}\ kg$.

1. Pour chaque rayonnement suivant, dire en justifiant s'il y a un effet photoélectrique :
- rayonnement 1 : $\lambda_1 = 300$ nm
- rayonnement 2 : $\nu_2 = 1{,}00 \times 10^{15}$ Hz
- rayonnement 3 : $\nu_3 = 5{,}00 \times 10^{15}$ Hz

2. Calculer alors l'énergie cinétique et la vitesse de l'électron émis.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- Ce ne sont pas les mêmes grandeurs qui caractérisent les rayonnements : le premier est caractérisé par une longueur d'onde, les deux autres par la fréquence.

LES VERBES D'ACTION

- Justifier : trouver les calculs ou les arguments qui démontrent la réponse.
- Calculer : appliquer une formule mathématique.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. L'effet photoélectrique se produit pour un photon d'une fréquence supérieure à la fréquence seuil ν_S. On a la relation $W = h\nu_S$ avec h la constante de Planck, W le travail d'extraction.

On a donc $\nu_S = W/h = (5{,}10 \times 1{,}602 \times 10^{-19}) / (6{,}63 \times 10^{-34}) = 1{,}23 \times 10^{15}$ Hz.

On a aussi la relation $\lambda_S = c / \nu_S = 3{,}00 \times 10^8 / 1{,}23 \times 10^{15} = 2{,}44 \times 10^{-7}$ m $= 244 \times 10^{-9} = 244$ nm.

Si $\nu \geq \nu_S$ et $\lambda \leq \lambda_S$, l'électron est extrait.

Seul le rayonnement 3 peut extraire des électrons.

2. La conservation de l'énergie dans le cas de l'extraction d'un électron d'un matériau de travail W par un photon de fréquence ν s'exprime :

$E_{photon} = W + E_c$

$E_c = E_{photon} - W = h\nu - h\nu_S = h(\nu - \nu_S)$.

AN : $E_c = 6{,}63 \times 10^{-34} \times (5{,}00 \times 10^{15} - 1{,}23 \times 10^{15}) = 2{,}50 \times 10^{-18}$ J.

Pour le calcul de la vitesse de l'électron, on a $E_c = \frac{1}{2} m_e v^2$

$v^2 = \frac{2E_c}{m_e}$ et $v = \sqrt{\frac{2E_c}{m_e}}$

AN : $v = \sqrt{2 \times 2{,}50 \times 10^{-18} / (9{,}11 \times 10^{-31})} = 2{,}34 \times 10^6\ m \cdot s^{-1}$.

QUELQUES CONSEILS

1. Convertir les eV en J.
2. Appliquer la conservation de l'énergie du photon.

EXERCICE SIMILAIRE

27 Zinc électrique

On éclaire une plaque de zinc avec une lampe à vapeur de mercure dont les principales raies d'émission ont les longueurs d'onde suivantes : 302 nm ; 313 nm ; 365 nm ; 405 nm ; 436 nm ; 546 nm ; 578 nm.

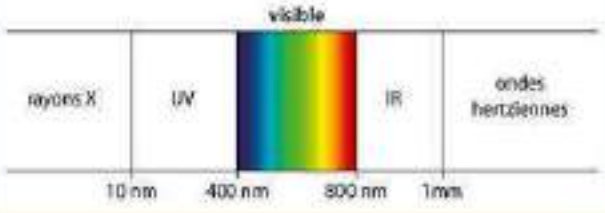
Données : $c = 3{,}00 \times 10^8\ m \cdot s^{-1}$; $h = 6{,}63 \times 10^{-34}\ J \cdot s$; $eV = 1{,}602 \times 10^{-19}$ J, $m_e = 9{,}11 \times 10^{-31}$ kg, $W(Zn) = 3{,}36$ eV.

1. Rappeler la définition de l'effet photoélectrique.

2. Montrer qu'il y a émission d'un électron uniquement pour les longueurs d'onde du domaine des ultraviolets.

3. Calculer l'énergie cinétique de l'électron extrait par un photon de longueur d'onde 302 nm.

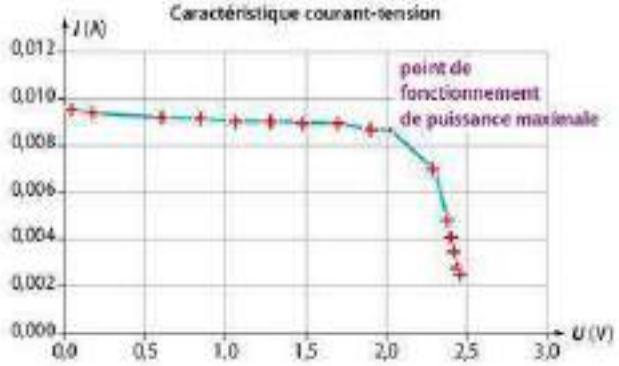
Données : *domaines d'ondes électromagnétiques*



Exercice résolu EN AUTONOMIE

28 Étude d'une cellule photovoltaïque

Lors d'une séance de travaux pratiques, on éclaire une cellule photovoltaïque de surface 45 cm^2 avec une source lumineuse d'éclairement 85 $W \cdot m^{-2}$. On mesure la tension aux bornes de la cellule pour différentes valeurs de l'intensité du courant électrique I. On trace la courbe suivante et on détermine le point de fonctionnement de puissance maximale.



***Données** : On a la relation $P_{lumineuse} = E \times S$ avec $P_{lumineuse}$ la puissance lumineuse émise en W, E l'éclairement en $W \cdot m^{-2}$ et S la surface de la cellule en m^2.*

1. **Expliquer** comment fait-on pour déterminer expérimentalement le point de fonctionnement de puissance maximale.

2. **Calculer** le rendement de la cellule photovoltaïque étudiée en pourcentage.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- On donne l'éclairement E et la surface S et la formule reliant puissance, éclairement et surface.
- Le point correspondant à la puissance électrique maximale est indiqué sur la caractéristique.

LES VERBES D'ACTION

- **Expliquer** : détailler les différentes étapes à suivre.
- **Calculer** : appliquer une formule mathématique.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. On calcule pour chaque valeur $P = U \times I$, puis on trace $P = f(U)$ et on détermine pour la valeur maximale de P, la valeur U_m. On reporte alors la valeur de U_m sur la courbe pour trouver le **point de fonctionnement de puissance maximale**.

2. $\eta = \dfrac{P_{électrique}}{P_{lumineuse}} \times 100$

On lit pour le point de fonctionnement maximal :

$U_m = 2{,}0$ V et $I_m = 0{,}0083$ A donc $P_{électrique} = U_m \times I_m$

AN : $P_{électrique} = 2{,}0 \times 0{,}0083 =$ **0,017 W.**

$P_{lumineuse} = E \times S$ ***AN :*** $P_{lumineuse} = 85 \times (45 \times 10^{-4})^2 =$ **0,17 W.**

$\eta = \dfrac{P_{électrique}}{P_{lumineuse}} \times 100$ $\eta = \dfrac{0{,}017}{0{,}17} \times 100 =$ **10 %**

QUELQUES CONSEILS

2. Déterminer les coordonnées du point de fonctionnement maximal pour calculer la puissance électrique maximale.

EXERCICE SIMILAIRE

29 Caractéristiques d'un module



Un fabricant fournit les données suivantes pour un module photovoltaïque en silicium monocristallin de surface $S = 0{,}25$ m^2 utilisé pour l'habitat :

Pour une irradiance solaire standard de 1 000 W · m^{-2} :

Puissance maximale (P_m) : 5 W

On souhaite tracer la courbe $I = f(U)$ et $P = g(U)$ pour cette cellule photovoltaïque. On obtient les mesures suivantes pour une lampe d'éclairement 97 $W \cdot m^{-2}$.

U (V)	20,8	19,9	18,8	17,5	15,8	13,5	7,5	4,4	0,061
I (mA)	0,0	45,5	84,1	116	150	173	200	210	224

1. Représenter le schéma du montage à réaliser pour obtenir ces mesures.

2. Sur une feuille de papier millimétré ou à l'aide d'un logiciel tableur-grapheur, tracer la caractéristique $I = f(U)$.

3. a. Déterminer en expliquant la démarche la puissance électrique maximale $P_{électrique}$

b. Calculer le rendement.

c. Commenter le résultat obtenu.

S'entraîner pour maîtriser

SAVOIR RÉDIGER

30 Énergie et fréquence

Énoncé

On éclaire une plaque d'argent avec un rayonnement de fréquence ν variable. On relève pour chaque valeur l'énergie cinétique de l'électron émis. Le tableau ci-dessous présente les mesures obtenues.

Fréquence $\times 10^{14}$ Hz	1,0	5,0	10	20	40	80	100	150	200
E_c (eV)	x	x	0	4,0	12,3	28,8	37,0	57,8	78,5

1. Expliquer pourquoi certaines valeurs d'énergie cinétique ne sont pas indiquées.

2. a. Tracer $E_c = f(\nu)$.

b. Commenter la courbe obtenue.

3. Déterminer en justifiant le travail d'extraction de l'argent.

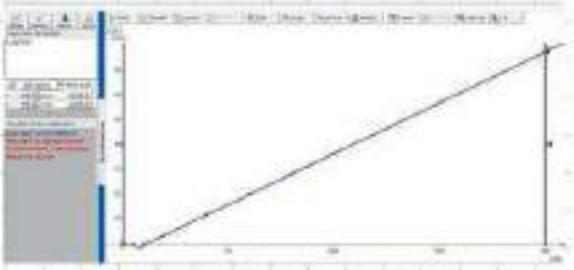
DONNÉES

- Célérité de la lumière dans le vide $c = 3{,}00 \times 10^8$ m · s^{-1} ; constante de Planck $h = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J · s.
- 1 eV = $1{,}602 \times 10^{-19}$ J ; $m_e = 9{,}11 \times 10^{-31}$ kg.

Solution proposée par un élève

1. Il n'y a pas d'énergie cinétique car la vitesse de l'électron est nulle.) Il n'y a surtout pas d'électron émis.

2. a.

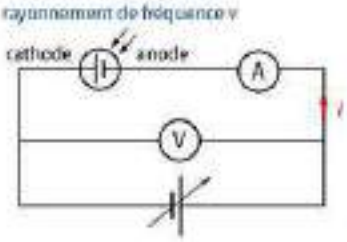


b. On obtient une droite.) Préciser.

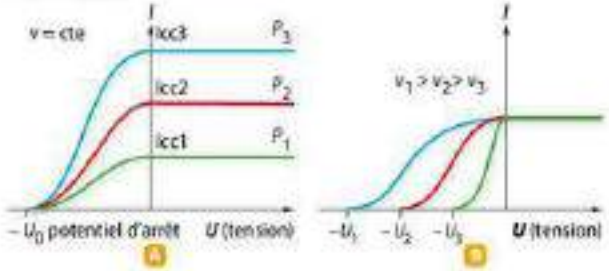
3. On lit sur la courbe $W = -4{,}10$ eV) Le travail d'extraction n'est pas négatif.

31 Caractéristique d'une cellule photoélectrique

On réalise le montage ci-contre pour tracer la caractéristique d'une cellule photoélectrique.



La tension d'arrêt notée U_0 est la tension qu'il faut appliquer entre l'anode et la cathode pour stopper les électrons émis par la cathode. En appliquant le théorème de l'énergie cinétique, on obtient la relation $E_c = -eU_0$ avec E_c, l'énergie cinétique de l'électron et e, la charge de l'électron. On trace la caractéristique de la cellule photoélectrique pour trois rayonnements de même fréquence mais de puissances différentes telles que $P_2 = 2P_1$ et $P_3 = 3P_1$ (A) puis pour trois rayonnements de fréquences ν_1 et ν_2 et ν_3 telles que $\nu_2 = 2\nu_3$ et $\nu_1 = 3\nu_3$ de puissance P égales (B).



1. Montrer que l'énergie cinétique du photon est proportionnelle à la fréquence du rayonnement.

2. Montrer que l'intensité du courant de saturation I_{cc} est proportionnelle à la puissance de la source.

3. Expliquer en quoi ces résultats ne sont pas compatibles avec le modèle ondulatoire de la lumière.

32 Matériau mystère

DÉMARCHES DIFFÉRENCIÉES



Un matériau de nature inconnue éjecte un électron avec une énergie de $1{,}0 \times 10^{-19}$ J sous l'effet d'un photon de fréquence $\nu = 7{,}5 \times 10^{14}$ Hz.

***Données** : longueur d'onde seuil de différents matériaux.*

UV	650 nm		Cs
UV	540 nm		K
UV	500 nm		Ba
UV	370 nm		Zn
UV	290 nm		Cu

DÉMARCHE EXPERTE

Déterminer à l'aide des données la nature du matériau.

DÉMARCHE AVANCÉE

1. Exprimer le travail d'extraction en fonction de l'énergie cinétique de l'électron et l'énergie du photon incident puis calculer sa valeur.

2. Exprimer la longueur d'onde seuil en fonction du travail d'extraction et calculer sa valeur.

33 Nobel prize

Excerpt from the speech of S. Arrhenius at the Nobel Prize in Physics awarded to Albert Einstein in 1921.

"Your Majesty, Your Royal Highnesses, Ladies and Gentlemen.

The studies for which Einstein has received the Nobel Prize, falls within the domain of the quantum theory founded by Planck in 1900. This theory asserts that radiant energy consists of individual particles, termed "quanta", approximately in the same way as matter is made up of particles, i.e. atoms. This remarkable theory, for which Planck received the Nobel Prize for Physics in 1918, suffered from a variety of drawbacks and about the middle of the first decade of this century it reached a kind of impasse. Then Einstein came forward with his work on specific heat and the photoelectric effect.

(...)The most extraordinary aspect of this effect was that the electron emission velocity is independent of the intensity of the illuminating light, which is proportional only to the number of electrons, whereas the velocity increases with the frequency of the light.

(...) [In Einstein's interpretation] when a quantum of light falls on a metal plate it can at most yield the whole of its energy to an electron there. A part of this energy is consumed in carrying the electron out into the air, the remainder stays with the electron as kinetic energy. This applies to an electron in the surface layer of the metal. Only if the quantum contains sufficient energy for the electron to perform the work of detaching itself from the metal does the electron move out into the air. Consequently, only light having a frequency greater than a certain limit is capable of inducing a photoelectric effect, however high the intensity of the irradiating light. If this limit is exceeded the effect is proportional to the light intensity at constant frequency."

1. a. Pour quels travaux Albert Einstein a-t-il reçu le prix Nobel de physique ?
b. Expliquer l'importance historique de ces travaux.

2. Relever les caractéristiques de l'effet photoélectrique citées dans le texte.

3. a. Comment appelle-t-on maintenant le "quanta" d'énergie ?
b. Donner ses caractéristiques.

4. Citer deux applications de l'effet photoélectrique.

34 Rendement et éclairement

TABLEUR-GRAPHEUR

On réalise les mesures ci-dessous pour un panneau photovoltaïque de surface 1,50 m^2.

Pour un éclairement de 600 $W \cdot m^{-2}$

I(A)	4,6	4,5	4,6	4,5	4,6	4,6	4,6	4,1	3,8	3,0	2,0	1,0	0
U(V)	0	5,0	7,0	10	15	20	22	25	28	30	33	35	36

Pour un éclairement de 800 $W \cdot m^{-2}$

I(A)	6,0	6,1	6,0	6,0	6,1	6,0	6,0	5,7	5,5	4,2	3,0	2,0	0
U(V)	0	5,0	7,0	10	15	20	22	25	28	30	33	35	36

***Donnée :** Incertitude sur le rendement*

$$U(\eta) = \eta \times \sqrt{\frac{U(P_m)^2}{P_m^2} + \frac{U(E)^2}{E^2} + \frac{U(S)^2}{S^2}}$$

1. a. À l'aide d'un tableur-grapheur, tracer pour chaque éclairement $I = f(U)$.
b. Calculer P puis tracer $P = g(U)$ pour chaque éclairement.

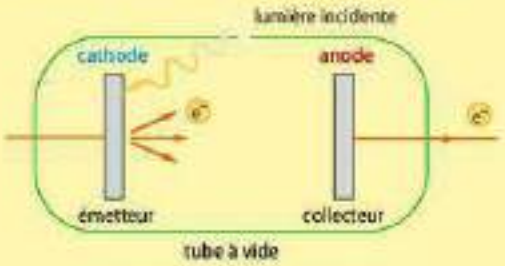
2. a. Déterminer le rendement du panneau pour chaque éclairement.
b. Évaluer l'incertitude sur le rendement.

3. L'éclairement a-t-il une influence sur le rendement du panneau photovoltaïque ?

À L'ORAL

35 Cellule photoélectrique et application

Élaborer un exposé oral de quelques minutes présentant *le principe de fonctionnement d'une cellule photoélectrique dont le schéma est représenté ci-dessous.



*le principe de deux dispositifs qui l'exploitent comme par exemple le luxmètre, le spectromètre, le spectrophotomètre, le photomultiplicateur etc.

Les mots-clés à utiliser

- cathode
- anode
- électrons
- courant électrique
- fréquence seuil
- intensité lumineuse
- photon

36 RETOUR SUR LA PAGE D'OUVERTURE

Les panneaux photovoltaïques produisent de l'électricité à partir de la lumière du Soleil.



Préparer un exposé oral qui explique :
- en quoi les travaux sur l'effet photoélectrique ont ouvert la voie à la physique quantique ;
- le principe de 2 dispositifs qui exploitent l'interaction lumière-matière.

Développer ses compétences

37 Expérience de Millikan

RÉSOLUTION DE PROBLÈME

50 min

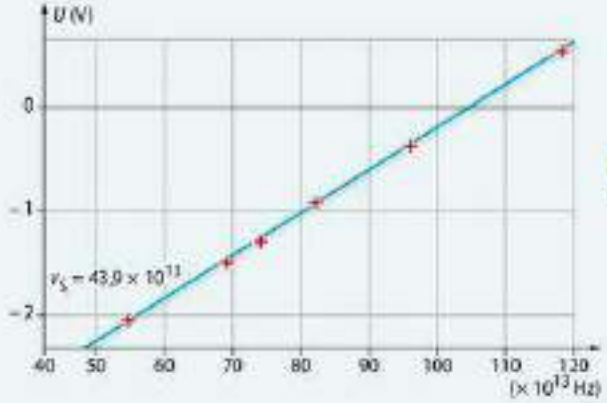
C.DM Présenter une démarche de manière argumentée, synthétique et cohérente

Robert Millikan (1868-1953), scientifique américain, ne croyait pas à l'interprétation de l'effet photoélectrique d'Albert Einstein (1879-1955), physicien allemand.

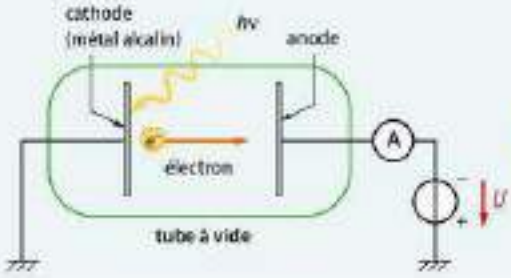


DOC 1 Principe de l'expérience

Millikan réalise donc l'expérience suivante (C) avec des métaux : un rayonnement de fréquence ν extrait des électrons de la cathode. Ces électrons sont collectés à l'anode. On branche ce dispositif à une source de tension variable U. Pour une certaine valeur de la tension appelée tension d'arrêt et notée U_0, les électrons sont arrêtés et annulent le courant dans le circuit. Il mesure U_0 pour différente valeur de ν puis trace U_0 en fonction de ν (A).



A Courbe obtenue par Robert Millikan en 1916 pour le sodium



B Dispositif expérimental

DONNÉES

- Célérité de la lumière dans le vide $c = 3{,}00 \times 10^8$ m · s^{-1} ;
- Constante de Planck $h = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J · s
- 1 eV = $1{,}602 \times 10^{-19}$ J
- $e = 1{,}60 \times 10^{-19}$ C
- Dans les conditions de l'expérience on a $E_c = -eU_0$

DOC 2 Résultats et prolongements

L'expérience de Millikan valide non seulement l'interprétation de l'effet photoélectrique d'Albert Einstein mais permet aussi une détermination expérimentale de la constante de Planck h.

Robert Millikan obtint le prix Nobel en 1923 pour ses travaux sur la charge élémentaire e et pour ceux sur l'effet photoélectrique.

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Rappeler l'hypothèse d'Albert Einstein pour interpréter l'effet photoélectrique.
2. Exprimer l'énergie cinétique de l'électron en fonction de la fréquence seuil du matériau ν_s et de la fréquence du rayonnement incident ν.
3. Déterminer la valeur du coefficient directeur de la droite obtenue pour le sodium.

PROBLÉMATIQUE

Déterminer la valeur de h mesurée par Robert Millikan en 1916 et la comparer à la valeur actuellement admise.

Il est attendu une prise d'initiatives et une présentation de la démarche suivie même s'il elle n'a pas abouti.

À la date de publication de ce manuel, les notions enseignées dans ce chapitre sont exclues de l'épreuve écrite.

38 Photodiode et DEL

ANALYSE ET SYNTHÈSE DE DOCUMENTS

30 min

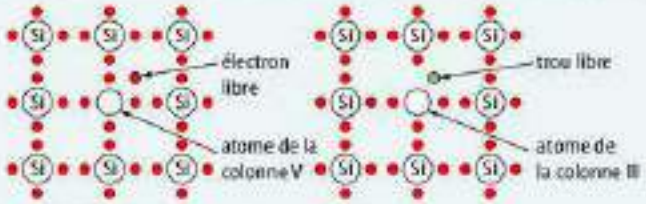
COM Présenter une démarche de manière argumentée, synthétique et cohérente

La photodiode et la diode électroluminescente (DEL) sont des dispositifs qui exploitent l'interaction lumière-matière et la technologie des semi-conducteurs.



DOC 1 Jonction PN

La photodiode détecte la lumière, la diode électroluminescente émet de la lumière. Elles sont constituées d'une jonction PN c'est-à-dire la jonction d'une zone contenant un semi-conducteur dopé N qui possède un surplus d'électrons et une zone contenant un semi-conducteur dopé P c'est-à-dire qui présente un défaut d'électrons autrement dit une présence de « trous ».



Exemple de dopage p et n pour le silicium

DOC 2 Schémas de deux composants



Composant 1 Composant 2

DOC 3 Bandes d'énergie

Les niveaux d'énergie possibles des matériaux semi-conducteurs sont situés dans deux bandes : la bande de valence et la bande de conduction. Un semi-conducteur peut absorber ou émettre des photons dont l'énergie est supérieure à celle du « gap ».

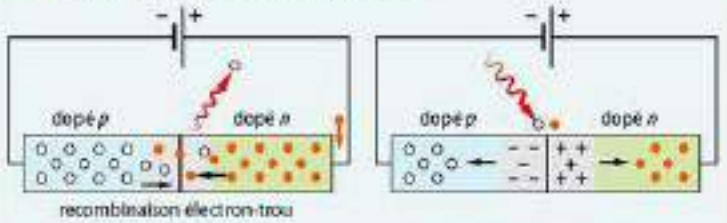


Bandes de valence et de conduction

Si	GaSb	GaP	GaAs
1,12	0,68	2,25	1,43

Quelques valeurs d'énergie de gap de matériaux semi-conducteurs utilisés en eV

DOC 4 Principes de fonctionnement

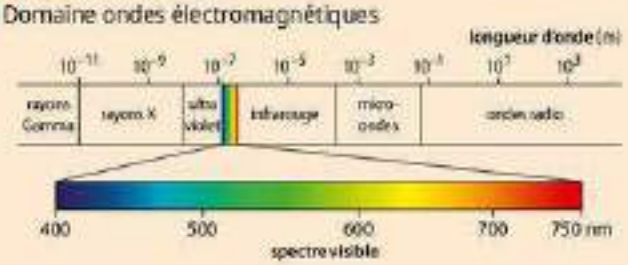


Jonction PN polarisée en direct
Sens passant

Jonction PN polarisée en inverse
Sens bloquant

DONNÉES

- Célérité de la lumière dans le vide $c = 3{,}00 \times 10^{8}\ m \cdot s^{-1}$;
- Constante de Planck $h = 6{,}63 \times 10^{-34}\ J \cdot s$
- $1\ eV = 1{,}602 \times 10^{-19}\ J$
- Domaine ondes électromagnétiques



QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Pourquoi peut-on dire que la photodiode et la DEL exploitent l'interaction lumière-matière ?
   b. Citer un autre dispositif qui exploite cette interaction.
2. a. Rappeler les caractéristiques du photon (définition, énergie, masse, vitesse).
   b. Déterminer de quel(s) domaine(s) d'ondes électromagnétiques proviennent les photons qui peuvent être absorbés par chaque semi-conducteur cité.

SYNTHÈSE

Comparer le fonctionnement de la photodiode et de la diode électroluminescente en précisant pour chaque dispositif :
- **le principe de fonctionnement ;**
- **le schéma du composant ;**
- **s'il y a émission ou absorption de photon ;**
- **un exemple d'utilisation**

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

À la date de publication de ce manuel, les notions enseignées dans ce chapitre sont exclues de l'épreuve écrite.

Retrouvez des exercices de synthèse p. 522

PRÉPA BAC

39 Production d'électricité — RÉSOLUTION DE PROBLÈME

30 min

AN/RA Choisir un modèle ou des lois pertinentes

Les panneaux photovoltaïques sont utilisés pour produire l'électricité des particuliers.

DONNÉE

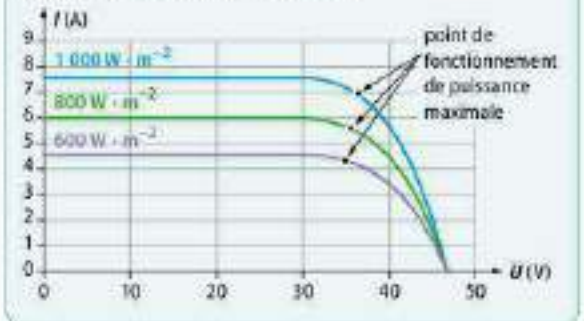
- Moyenne annuelle de l'énergie reçue sur une surface orientée au Sud et inclinée d'un angle égal à la latitude 3,4 kWh/m² · j à Orléans.

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Calculer le rendement du panneau photovoltaïque pour un éclairement de 800 W · m^{-2}.
2. Déterminer l'énergie lumineuse moyenne reçue par 1 m² à Orléans en une année en kWh.

DOC Caractéristiques d'un panneau photovoltaïque

La courbe ci-contre présente la caractéristique intensité tension d'un panneau photovoltaïque de surface 1,50 m² pour trois éclairements.



PROBLÉMATIQUE

Une habitation à Orléans consomme une énergie électrique de 5 000 kWh par an. Les propriétaires souhaitent que 50 % de l'énergie électrique soit produite par les panneaux photovoltaïques étudiés.

Déterminer la surface du toit à couvrir.

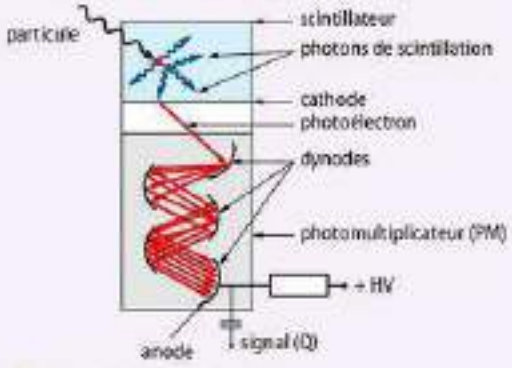
VERS LE SUP'

40 Détection de particules

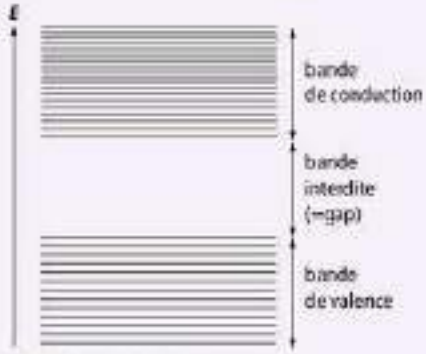
En physique des particules, on utilise différents dispositifs pour détecter des particules cosmiques ou obtenues dans des expériences de physique nucléaire.

Dans les détecteurs à scintillation, on associe un scintillateur à un tube photomultiplicateur pour détecter, compter et déterminer l'énergie des particules. Les particules excitent un scintillateur qui émet alors des photons dans le domaine du visible provoquant l'émission d'électrons à la cathode Q. Un système d'électrodes, appelées dynodes, permet de démultiplier le nombre d'électrons (par succession d'émissions secondaires). On mesure alors le courant obtenu à l'anode.

Dans les détecteurs à semi-conducteur, on mesure le courant électrique obtenu lorsqu'une particule est absorbée par le matériau, ce qui provoque le passage d'un électron de la bande de valence à la bande de conduction E.



Q *Principe d'un scintillateur*



E *Bandes d'énergie*

***Données :** domaine du visible : 400-800 nm ; énergie du gap du silicium : 1,12 eV, du germanium : 0,66 eV*

1. a. Quel est le nom de l'effet exploité au niveau de la cathode ?
b. Calculer la fréquence seuil minimale de la cathode pour que cet effet ait lieu avec des photons du domaine du visible.
c. Justifier l'utilisation du terme « photons » et pas « onde lumineuse » dans l'explication du principe du photomultiplicateur.
2. Calculer l'énergie minimale des particules pour qu'elles puissent être détectées par les semi-conducteurs suivants :
a. le silicium ; b. le germanium.
3. a. La représentation des énergies possibles d'un solide en bandes provient de la quantification de l'énergie des atomes, préciser ce terme.
b. Recopier et représenter le gain d'énergie apporté par une particule en supposant que celui-ci engendre un courant électrique.

À la date de publication de ce manuel, cette capacité expérimentale est exclue de l'épreuve pratique.

GESTE ECE n°9

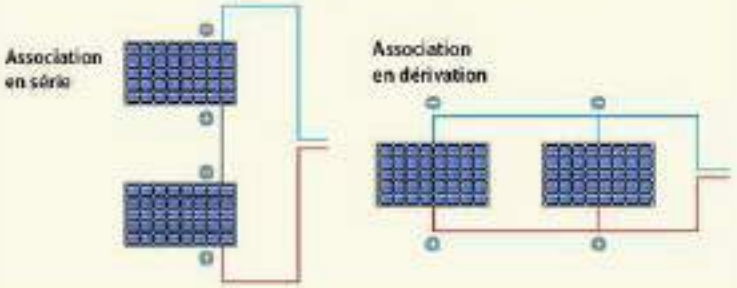
Associations de cellules

Contexte

Un panneau photovoltaïque est un assemblage de modules qui sont eux même constitués de plusieurs cellules photovoltaïques reliées entre elles.
L'objectif est d'étudier comment évolue le rendement pour une association de cellules en série et en dérivation.

Documents mis à disposition

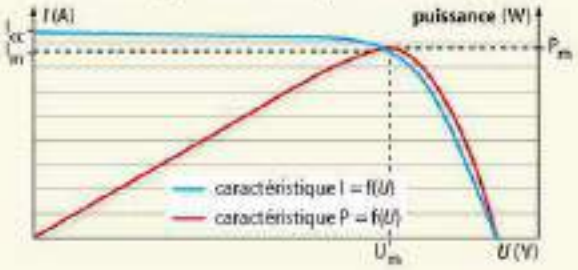
Cellule, module et panneau photovoltaïque.



Un luxmètre mesure l'éclairement en lux de symbole lx. On admettra que 100 lx = 1 W · m^{-2}.
On a la relation $E = P \times S$ avec E l'éclairement, P la puissance lumineuse reçue et S la surface de la cellule.



Détermination de la puissance électrique maximale fournie par une cellule photovoltaïque.



Matériel mis à disposition

- 2 cellules photovoltaïques identiques de surface S donc la caractéristique est donnée pour un éclairement E.
- 2 multimètres
- un tableur grapheur
- Une résistance variable 10-10kΩ
- Un luxmètre
- Une lampe de bureau
- Un double décimètre

Travail à effectuer

1. (ANA/RA) **Proposition de protocole expérimental** *(15 min conseillées)*

- Proposer un protocole expérimental pour comparer les caractéristiques de deux cellules branchées en série et deux cellules branchées en dérivation.

Être en mesure de présenter le protocole

2. (RÉA) **Mise en œuvre du protocole expérimental proposé** *(25 min conseillées)*

- Mettre en œuvre le protocole et tracer la caractéristique de chaque association.

Être en mesure de présenter les résultats

3. (VAL) **Exploitation du résultat obtenu** *(20 min conseillées)*

Pour chaque association de cellules :
- Tracer $P = f(U)$.
- Mesurer la puissance électrique maximale fournie par l'association.
- Déterminer la puissance lumineuse reçue
- Calculer le rendement de chaque association.
- Identifier une source d'incertitude possible dans les mesures réalisées.

Défaire le montage et ranger la paillasse.

PISTE POUR LE GRAND ORAL PRÉPA BAC

Pour se préparer à l'Oral
➥ Livret LES CLÉS DU BAC (en début de manuel)

UNE QUESTION

L'utilisation des panneaux photovoltaïques peut-elle rendre les transports propres ?

Enjeu de la question

Les transports, en particulier aériens, sont polluants et à l'origine de l'émission de dioxyde de carbone, un gaz à effet de serre. L'utilisation de l'énergie solaire permettrait de réduire leur impact.

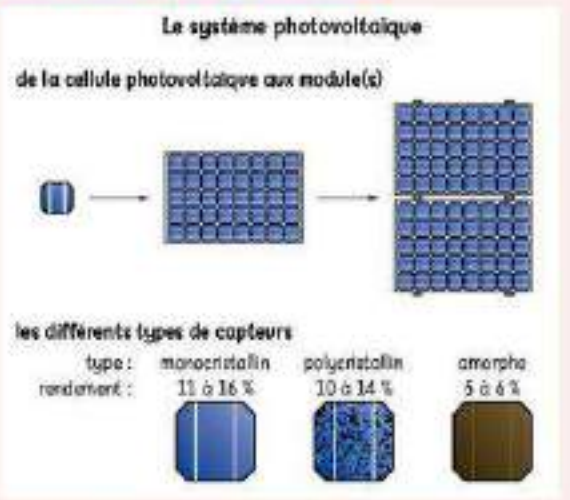
Proposition de plan de présentation

1. Les transports et leurs impacts sur l'environnement.
2. Rendements actuels des différents types de panneaux photovoltaïques.
3. Les prototypes : *Solar Impulse*, *Energy Observer*, *Éroole*, route solaire.
4. Conclusion : avantages et inconvénients de l'utilisation de panneaux photovoltaïques dans les transports.

Les mots-clés

semi-conducteur ▸ réchauffement climatique ▸ rendement ▸ ensoleillement

Exemple de support de présentation



Utilisation du photovoltaïque

QUESTIONS D'APPROFONDISSEMENT POSSIBLES



UN EXEMPLE DE PROJET PROFESSIONNEL

Les métiers relatifs au développement durable sont des métiers d'avenir. L'exploitation de l'énergie solaire est prometteuse car elle exploite une source d'énergie renouvelable. De nombreux prototypes sont actuellement à l'essai.

Après le bac : *Bac + 5 diplôme d'ingénieur ou master du domaine des matériaux*

Autres métiers : *Technicien(ne) photovoltaïque, électricien(ne) photovoltaïque*

L'ingénieur(e) de recherche photovoltaïque travaille dans des laboratoires de recherche pour comprendre les phénomènes à l'origine des dispositifs utilisant des énergies renouvelables et mettre aux points des matériaux et dispositifs innovants pour accroître les rendements en restant respectueux de l'environnement.



Avant d'aborder le chapitre

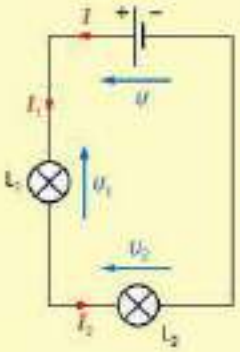
EN AUTONOMIE

LES ACQUIS INDISPENSABLES

Seconde — 1re Enseignement de spécialité

- La tension et l'intensité du courant vérifient les lois des circuits électriques.

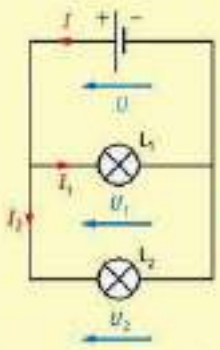
circuit série



Loi d'unicité de l'intensité : $I = I_1 = I_2$

Loi d'additivité des tensions : $U = U_1 + U_2$

circuit en dérivation



Loi d'unicité des tensions : $U = U_1 = U_2$

Loi d'additivité des intensités : $I = I_1 + I_2$

- Un conducteur ohmique est caractérisé par sa résistance électrique R qui s'exprime en ohm (Ω). Elle vérifie la loi d'Ohm :

$U = R \cdot I$ (tension (en V) ; résistance (en Ω) ; intensité (en A))

- Les conducteurs contiennent des **porteurs de charges** libres de se déplacer : les électrons libres dans les métaux, les ions dans les solutions.

- Lorsqu'ils sont soumis à une tension électrique, les porteurs de charges se déplacent de façon **ordonnée**.

- Le **débit de charges électriques** est appelé **intensité du courant électrique** :



$I = \frac{Q}{\Delta t}$ (intensité du courant électrique (en A) ; charge électrique traversant une section du circuit (en C) ; pendant une durée Δt (en s))

POUR VÉRIFIER LES ACQUIS

Pour chaque situation, rédiger une réponse qui explique en quelques lignes le raisonnement.

SITUATION 1



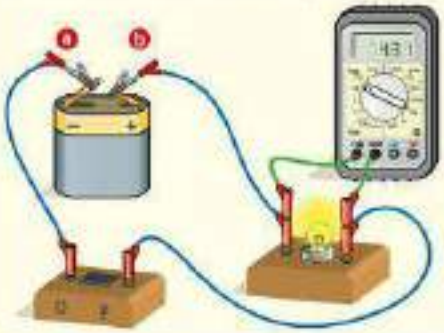
Lorsque l'on retire un pull en laine, on peut avoir « les cheveux électriques ».

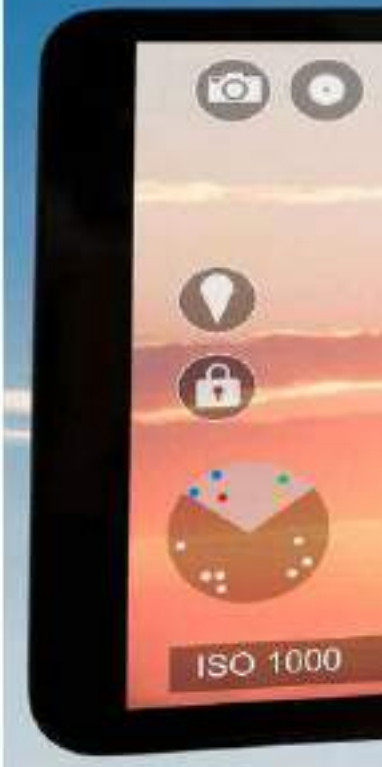
Quelle est l'origine de ce phénomène ?

SITUATION 2

On considère le circuit schématisé ci-dessous.

Que vaut la tension délivrée par la pile ?





CHAPITRE

20

PHYSIQUE

d'un système électrique



Les systèmes micro-électromécaniques, contenus par exemple dans un drone et les écrans tactiles, exploitent le comportement capacitif de certains capteurs. Comment peut-on modéliser ce type de dipôle et comprendre leur fonctionnement ?

– EXERCICE 35

NOTIONS ET CONTENUS

- Intensité d'un courant électrique en régime variable.
- Comportement capacitif.
- Modèle du condensateur : relation entre charge et tension, capacité d'un condensateur.
- Modèle du circuit RC série : charge et décharge d'un condensateur, temps caractéristique.
- Capteurs capacitifs.

CAPACITÉS EXPÉRIMENTALES

- Illustrer qualitativement l'effet de la géométrie d'un condensateur sur la valeur de la capacité. – Activité 1
- Identifier et tester le comportement capacitif d'un dipôle. – Activité 2
- Étudier la réponse d'un dipôle RC et déterminer son temps caractéristique. – Activités 3 et 4 – Pour préparer l'ECE

CAPACITÉS MATHÉMATIQUES

- Résoudre une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants avec un second membre constant. – Activité 3 – Pour préparer l'ECE

COMPÉTENCES :
(AN/RAI) Élaborer un protocole
(VAL) Confronter un modèles à des résultats expérimentaux

Capacité d'un condensateur

Il existe des condensateurs de forme et de structure très variées. La valeur de la capacité d'un condensateur est directement liée à sa géométrie et aux matériaux qui le constituent.



DOC 1 Du matériel utile

Le dispositif expérimental est composé :
- d'un multimètre utilisé en capacimètre ;
- d'un condensateur à plateau aussi appelé condensateur d'Aepinus (physicien allemand du XVIII[e] siècle) et de ses accessoires.



DOC 2 Modèle électrostatique du condensateur

Les lois de l'électrostatique permettent d'établir l'expression de la capacité C d'un condensateur plan dont les armatures de surface S et séparées d'une distance d.

$$C = \varepsilon \times \frac{S}{d}$$

capacité (F) ; surface (m^2) ; distance entre les deux armatures (m)

Le coefficient ε est appelé la permittivité et s'exprime en $F \cdot m^{-1}$. Sa valeur dépend du matériau isolant qui se trouve entre les armatures du condensateur.

VOCABULAIRE

- **Condensateur** : dispositif électrique capable de stocker des charges électriques.
- **Armatures** : conducteurs en regard (généralement des plaques) qui constituent le condensateur. Elles sont séparées par un milieu isolant.
- **Capacité** : grandeur qui évalue la charge électrique d'un condenseur par unité de tension (volt) entre ses armatures.

DÉMARCHE EXPERTE

En utilisant le matériel disponible, proposer une démarche qui permettra de confronter le modèle décrit dans le doc. 2 et la réalité expérimentale.

DÉMARCHE AVANCÉE

1. a. Relier les deux armatures du condensateur plan à un multimètre utilisé en mode capacimètre.
b. En analysant le modèle présenté dans le doc. 2, identifier les paramètres dont dépend la capacité d'un condensateur plan.
2. a. Pour chaque paramètre, proposer un protocole expérimental qui permette de confirmer quantitativement la validité du modèle.
b. Justifier pourquoi il est indispensable de ne faire varier qu'un seul paramètre à la fois.
3. Les résultats de vos mesures confirment-ils la validité du modèle proposé ?

DÉMARCHE ÉLÉMENTAIRE

1. Influence de la surface du condensateur

a. Positionner le dispositif pour un écartement de quelques millimètres. Relier les deux armatures à un multimètre utilisé en mode capacimètre.
b. Évaluer la surface des armatures utilisées et mesurer la valeur de la capacité correspondante.
c. Renouveler ces mesures avec les autres paires d'armatures disponibles.

2. Influence de l'écartement des armatures

a. Reprendre le montage précédent et mesurer la capacité du condensateur pour différentes valeurs de l'écartement entre les armatures.
b. Rassembler vos résultats dans un tableau.

3. Influence du matériau entre les armatures

a. Positionner une des plaques fournies entre les armatures et relever la valeur de la capacité.
b. Renouveler ces mesures avec les autres plaques de matériaux disponibles.

4. Conclusion

Vos mesures sont-elles en accord avec la relation mathématique donnée dans le doc. 2 ?

Je réussis si...

- **Je sais mesurer la capacité d'un condensateur.**
- **Je sais exploiter un modèle et questionner sa validité.**

TP

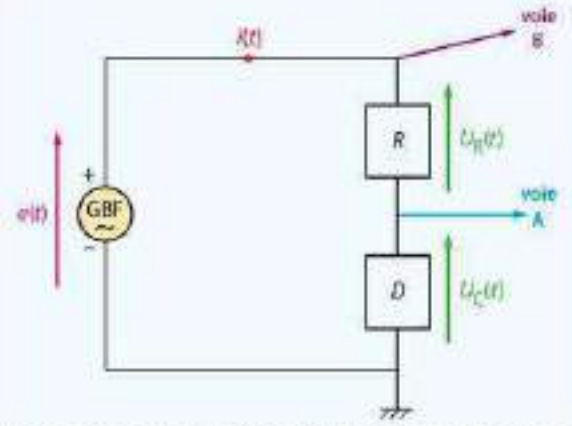
COMPÉTENCES :
APP Rechercher et organiser l'information
RÉA Mettre en œuvre un protocole expérimental

Comportement capacitif d'un dipôle

De nombreux dispositifs technologiques ont un comportement capacitif, c'est-à-dire qu'ils sont susceptibles de provoquer l'accumulation de charges électriques lors de leur fonctionnement.

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Pour évaluer le déphasage entre deux signaux sinusoïdaux, on utilise le circuit ci-dessous :



Les tensions sont visualisées à l'aide d'un oscilloscope. Le dipôle D est le composant étudié.

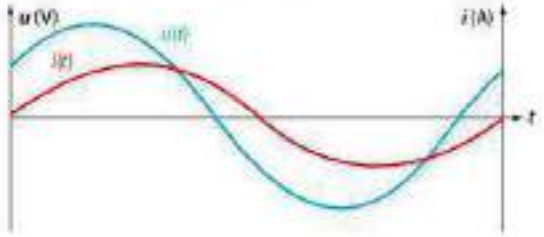
Pour tester un dipôle :

- réaliser le circuit schématisé ci-dessus et ajuster la valeur de la fréquence du GBF en mode sinusoïdal ;
- connecter les voies A et B de l'oscilloscope sur le circuit ainsi que la masse puis activer le mode bicourbes ;
- sur la voie B de l'oscilloscope, régler la base de temps pour visualiser quelques périodes et soustraire les deux signaux pour visualiser $u_R(t)$;
- identifier si $u_R(t)$ est en avance ou en retard de phase par port à $u_D(t)$.

DOC 1 Déphasage en régime sinusoïdal

En régime sinusoïdal, la tension $u(t)$ aux bornes d'un dipôle et l'intensité $i(t)$ du courant électrique qui le traverse sont des fonctions sinus de périodes identiques.

Dans de nombreux cas, ces deux signaux ne couperont pas l'axe des abscisses au même instant mais pourront être décalés vers la droite ou vers la gauche d'une certaine valeur appelé **déphasage**.

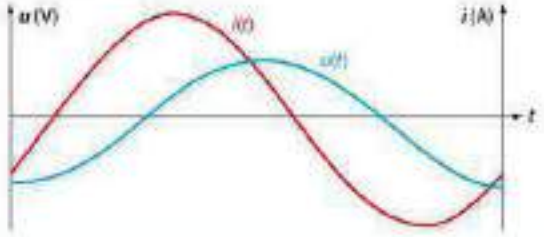


Dans le cas particulier, où les deux signaux s'annulent au même instant, on dit qu'ils sont en phase ou que leur déphasage est nul.

DOC 2 Déphasage et comportement capacitif

Lorsque le fonctionnement d'un dipôle peut être modélisé par celui d'un condensateur, on dit que ce dipôle a un **comportement capacitif.**

Cela se traduit par une intensité en avance de phase par rapport à la tension.



EXPLOITATION ET ANALYSE

1 a. Rappeler le lien entre la tension $u_R(t)$ et l'intensité du courant $i(t)$.

b. Pourquoi peut-on considérer que le signal $u_R(t)$ donne accès à l'allure de $i(t)$?

2 Expliquer pourquoi le protocole indique de soustraire les deux signaux sur la voie B.

3 Si le dipôle D est un conducteur ohmique de résistance R'. Que peut-on dire du déphasage entre la tension aux bornes de ce dipôle et l'intensité du courant qui la traverse ?

4 On considère l'oscillogramme du doc. 1. Pourquoi peut-on dire, dans ce cas, que $i(t)$ est en retard sur $u(t)$?

CONCLUSION

5 Vous disposez de trois dipôles masqués.

Identifier le ou les dipôle(s) qui ont un comportement capacitif en détaillant le raisonnement suivi et les expériences réalisées.

Je réussis si...

- **Je sais utiliser les appareils électriques usuels du laboratoire de physique.**
- **Je sais identifier et tester le comportement capacitif d'un dipôle.**

TP

COMPÉTENCES :
(RÉA) Mettre en œuvre les étapes d'une démarche
(VAL) Faire preuve d'esprit critique, procéder à des tests de vraisemblance

Flash photographique et condensateur



Appareil photo compact, appareil reflex, smartphone... tous les dispositifs autorisant la prise de photographies intègrent un flash qui permet de compenser un éclairage ambiant insuffisant. Comment les condensateurs contribuent au fonctionnement de ces flashs ?

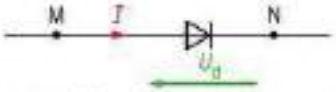
DOC 1 Le flash en photographie

Un flash est un dispositif utilisé en photographie pour produire un éclair lumineux afin d'éclairer l'espace photographié. La plupart des flashs actuels sont électroniques et remplacent les anciennes lampes flash halogènes. La durée du flash est très courte et généralement comprise de 1/1000e à 1/200e de seconde.

DOC 2 Diode électroluminescente (DEL)

Une diode électroluminescente (DEL) est un dispositif semi-conducteur qui émet de la lumière visible lorsqu'un courant électrique la traverse.

Une DEL est un dipôle polarisé, il ne laisse passer le courant que dans le sens indiqué sur le schéma ci-dessous (appelé sens passant) et à la condition que la tension u_d à ses bornes soit supérieure ou égale à une tension appelée tension de seuil ($u_{seuil} > 0$ V).



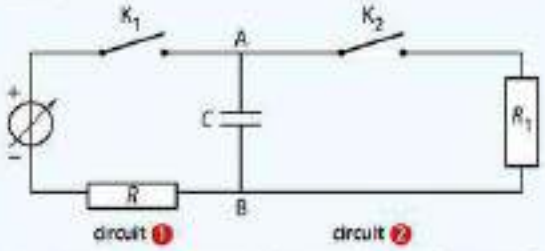
La borne M est repérée par une connection légèrement plus longue que la borne N :



PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Réaliser le montage suivant en respectant les polarités indiquées sur le condensateur.

On prendra par exemple $C = 1{,}0 \times 10^3$ µF, $R = 470\ \Omega$ et $R_1 = 33\ \Omega$. Les interrupteurs K_1 et K_2 sont initialement ouverts.



- Ajuster la tension aux bornes du générateur afin d'obtenir une valeur de 6,0 V.
- Réaliser les connexions nécessaires pour mesurer la tension u_{AB} à l'aide de l'interface d'acquisition.
- Régler les paramètres d'acquisition.
- Charger le condensateur en fermant l'interrupteur K_1 et en laissant K_2 ouvert.
- Ouvrir K_1, lancer l'acquisition et fermé l'interrupteur K_2 pour procéder à l'enregistrement de la décharge du condensateur.

EXPÉRIENCES ET MESURES

Détermination des paramètres d'acquisition

1 a. Calculer la valeur théorique du temps caractéristique τ_{th} à partir des données.

b. En déduire la valeur de la durée d'acquisition qui permet de visualiser 5 τ_{th}.

c. Comment choisir le nombre de points de mesure pour obtenir une acquisition la plus précise possible ?

2 Reproduire le schéma du circuit électrique et représenter les connexions à l'interface d'acquisition permettant de visualiser la tension u_{AB}.

EXPLOITATION ET ANALYSE

3 Déterminer graphiquement la valeur expérimentale du temps caractéristique τ_{exp} et comparer à la valeur théorique calculée précédemment.

On peut simuler le flash d'un appareil photographique en ajoutant en série dans le circuit 2 une diode électroluminescente (DEL).

4 a. Reproduire le schéma du circuit électrique en intégrant la DEL dans le circuit.

b. Si L'on remplace la résistance R_1 par une résistance $R_2 = 10\ \Omega$, comment varie la valeur de la durée du flash par rapport à la valeur τ_{exp} précédente ?

c. Vérifier expérimentalement votre hypothèse.

5 Expliquer pourquoi votre enregistrement montre que le condensateur n'est pas totalement déchargé à la fin de l'expérience.

SYNTHÈSE

6 À partir des expériences précédentes, proposer un protocole qui permettrait de réaliser un circuit modélisant un flash photographique. Valider expérimentalement votre proposition.

Je réussis si...

- **je sais mesurer la capacité d'un condensateur.**
- **je sais exploiter un modèle et questionner sa validité.**

TP

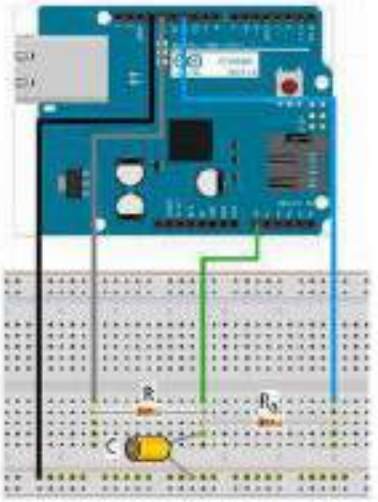
COMPÉTENCES :
(RÉA) Effectuer des procédures courantes
(COM) Utiliser un vocabulaire adapté et des modes de représentation

Temps caractéristique et capacité

Avant d'employer un condensateur dans un circuit électrique, il est impératif de contrôler la valeur de sa capacité. On peut pour cela exploiter les possibilités de calculs d'un microcontrôleur.

DOC 1 Dispositif expérimental

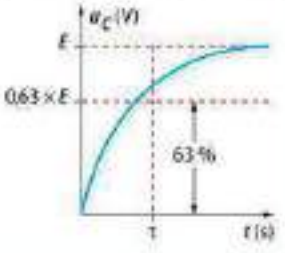
Le dispositif expérimental comprend : un condensateur à étudier associé en série avec une résistance R lors de sa charge et avec une résistance R_0 lors de sa décharge.



DOC 2 Constante de temps

Un circuit RC série est caractérisé par sa constante de temps τ. Elle est égale au produit de la résistance R du circuit (en ohms) et de la capacité C du circuit (en farads).

La grandeur τ correspond à la durée nécessaire pour que la tension aux bornes du condensateur, initialement déchargé, atteigne environ 63 % de la valeur d'une tension E générateur.



QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1 Justifier la consigne donnée à la ligne 15 en vous appuyant sur le modèle décrit dans le doc. 2.

2 Expliquer en quoi les lignes 17 et 18 du programme permettent de calculer le temps caractéristique τ du circuit RC et la capacité C du condensateur.

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

Comment adapté le programme précédent au matériel disponible et l'utiliser pour déterminer la valeur de la capacité d'un condensateur ?

DOC 3 Programmation

En utilisant un microcontrôleur, il est possible de mesurer la valeur du temps caractéristique d'un circuit RC série (FICHE PRATIQUE ➥ p. 562).

```
// définition de la broche de mesure du uC
// définition de la broche permettant la charge de C
// définition de la broche permettant la décharge de C
1  #define analogPin 0
2  #define chargePin 13
3  #define dischargePin 11
// définition des différentes grandeurs
4  unsigned long InstantInitial;
5  unsigned long Tau // Tau = TempsCaractéristique;
6  float Capacite;

7  void setup(){
8     pinMode(chargePin, OUTPUT);      //décharge
      préalable de C
9     digitalWrite(chargePin, LOW);
10    Serial.begin(9600);              //initialisation
      de l'affichage des résultats
11 }

12 void loop(){
13    digitalWrite(chargePin, HIGH);  //début de la
      charge de C
14    InstantInitial = millis();   //début de la mesure
   de tau
15    while(analogRead(analogPin) < 647){
        //647 correspond à 63% des 1023 bits pour la
   charge complète de C
16      }
17    Tau = millis() - InstantInitial;   //calcul de tau
18    Capacite = ((float) Tau / 12000) * 1000;
//affichage du temps caractéristique en millisecond
   (ms) et de la capacité en microfarad (uF)
19    Serial.print(Tau);
20    Serial.print(" ms ");
21    Serial.print((long) Capacite);
22    Serial.println(" uF");
//fin de la mesure et décharge de C
23    digitalWrite(chargePin, LOW);
24    pinMode(dischargePin, OUTPUT);
25    digitalWrite(dischargePin, LOW);
26    while(analogRead(analogPin) > 0){
27    }
28    pinMode(dischargePin, INPUT);
29 }
```

Je réussis si...

- Je sais mesurer la capacité d'un condensateur.
- Je sais utiliser un microcontrôleur.

1 Le modèle du condensateur

Intensité du courant électrique et charges électriques

L'existence d'un courant électrique dans un circuit électrique est due à un déplacement ordonné de porteurs de charges électriques. Dans les matériaux métalliques, ces porteurs de charges sont les électrons.

L'**intensité du courant électrique** correspond au débit de charges électriques, c'est-à-dire à la quantité d'électricité qui traverse la surface S du conducteur par seconde (FIG. 1).

Remarque. La quantité d'électricité est aussi appelée charge électrique. Elle est généralement notée q et s'exprime en coulomb (C).

En courant continu, l'intensité du courant I est constante ainsi que le débit de charge.

En courant variable, l'intensité du courant peut varier à chaque instant ; elle s'écrit comme une fonction dépendant du temps : $i(t)$.

L'intensité du courant électrique $i(t)$ est la dérivée par rapport au temps de la quantité d'électricité $q(t)$ qui traverse une section du conducteur :

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt}$$

$i(t)$: intensité du courant (A) ; $q(t)$: quantité d'électricité (C) ; t : temps (s)

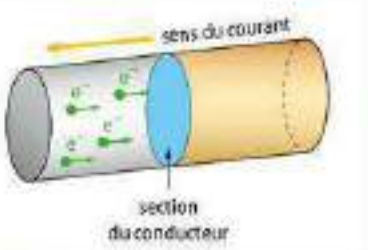


FIG. 1 L'intensité permet d'évaluer le débit de charge dans un conducteur.



Une animation sur la condensation de l'électricité.

Modèle du condensateur

Lorsque l'on approche un matériau conducteur chargé ❶ d'un autre conducteur non chargé ❷, il se produit sur les faces en regard des deux matériaux ❶ et ❷ une accumulation de charges positives et négatives.

Ce phénomène, qui résulte d'interactions électrostatiques, est appelé condensation de l'électricité. L'ensemble des matériaux ❶ et ❷ forme un condensateur.

Un condensateur est un ensemble de deux conducteurs placés l'un en face de l'autre et séparés par un isolant.

Les deux conducteurs sont appelés armatures du condensateur.

Les armatures d'un condensateur chargé portent des charges égales en valeur absolue mais de signes opposés. Il existe une tension entre les armatures d'un condensateur chargé (FIG. 3).

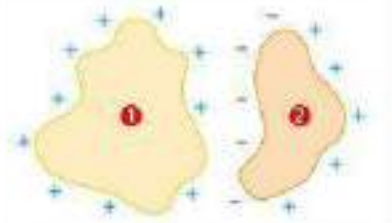


FIG. 2 Condensation de l'électricité.

Capacité du condensateur

La charge q portée par les armatures d'un condensateur est proportionnelle à la tension u entre les armatures. Le coefficient de proportionnalité, généralement noté C, est appelé **capacité du condensateur** et dépend des propriétés du condensateur utilisé :

$$q = C \cdot u$$

q : charge en coulomb (C) ; C : capacité (F) ; u : tension (V)

Dans le système international d'unité, la capacité s'exprime en farad (**F**).

Les capacités usuelles ont souvent des valeurs plus faibles et s'expriment en microfarad ($\mu F = 10^{-6}$ F) ou en nanofarad ($nF = 10^{-9}$ F) (FIG. 4).

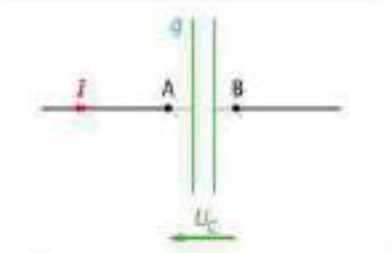


FIG. 3 Représentation symbolique d'un condensateur.

Comportement capacitif

Les deux résultats précédents permettent de démontrer que la tension aux bornes d'un condensateur et l'intensité du courant vérifient la relation :

capacité (F)

intensité du courant (A) → $i = C \cdot \frac{du}{dt}$ ← tension (V)

Cette équation différentielle implique que la tension et l'intensité sont deux grandeurs qui ne peuvent pas être en phase : c'est i qui est en avance de phase sur u.

Un dipôle pour lequel l'intensité et en avance de phase sur la tension a un comportement capacitif (FIG. 5).

Exemple de condensateur	Ordre de grandeur de la capacité
Démarrage de moteur électrique	10^{-4} F
Filtrage audio	10^{-5} à 10^{-6} F
Applications électroniques	10^{-7} à 10^{-9} F

FIG. 4 Capacité de quelques condensateurs.

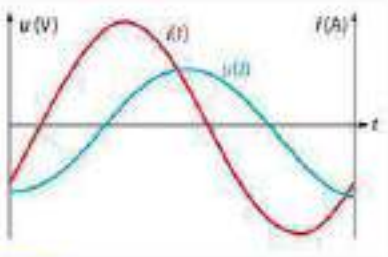


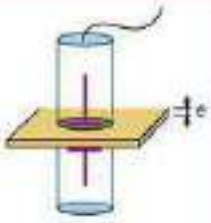
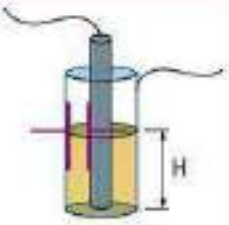
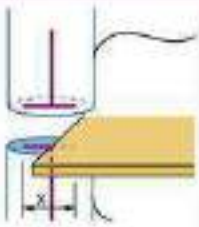
FIG. 5 Avance de phase de $i(t)$ sur $u(t)$.

Mesure de capacité et application aux capteurs

La capacité dépend de plusieurs paramètres, en particulier la surface des armatures, l'épaisseur et la nature du matériau isolant entre les armatures.

L'influence de ces grandeurs sur la valeur de la capacité permet d'expliquer le fonctionnement des **capteurs capacitifs**.

Ces dispositifs technologiques sont conçus pour réaliser la mesure de déplacement, d'épaisseur, de distance et de position. Ils fonctionnement sans contact, aussi bien avec des objets conducteurs ou isolants.

Capteur d'épaisseur	Capteur de niveau	Capteur de déplacement
		
Les deux faces du capteur jouent le rôle d'armatures	La paroi de la cuve et la sonde centrale jouent le rôle d'armatures, le liquide n'est pas conducteur	Les deux faces du capteur jouent le rôle d'armatures
La variation d'épaisseur entre les deux surfaces utilisées comme armature ...	La variation de niveau du liquide qui correspond à un changement de matériaux entre les armatures ...	Le passage d'un objet en déplacement entraîne la variation de la surface des armatures en regard et ...
... provoque une variation de la capacité qui peut être mesurée		

EXEMPLE

Les écrans tactiles fonctionnent sur le même principe que les capteurs capacitifs (FIG. 6). Une grille conductrice chargée, insérée entre deux plaques de verre joue le rôle de 1re armature et le doigt de l'utilisateur est la 2nde armature. L'apparition locale de ce condensateur est exploitée par le microprocesseur de commande du dispositif.

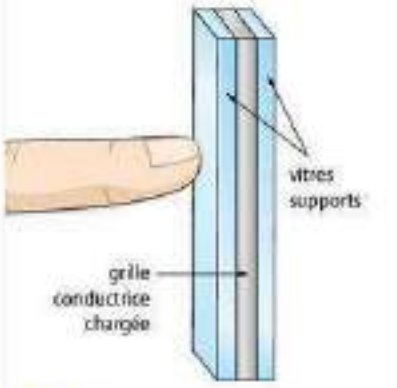


FIG. 6 Ecran tactile capacitif.

2 Le modèle du circuit RC série

On appelle **circuit RC série**, l'association en série d'un condensateur de capacité C et d'un conducteur ohmique de résistance R.

Charge d'un condensateur

Mise en équation

On considère un circuit RC série pour lequel le condensateur est initialement déchargé. On le relie via un interrupteur à un générateur idéal de tension continue E (FIG. 7).

Lorsque l'interrupteur est fermé à l'instant $t = 0$, le condensateur est déchargé et la tension u_C à ses bornes est donc nulle. Elle augmente ensuite progressivement au fur et à mesure de la charge du condensateur. Les lois de l'électricité permettent d'exprimer u_C et de calculer sa valeur en fonction du temps.

À chaque instant t, la loi d'additivité des tensions permet d'écrire : $E = u_C + u_R$

D'après la loi d'Ohm, on peut écrire : $u_R = R \cdot i$.

L'équation précédente devient : $E = u_C + R \cdot i$

De plus, $q = C \cdot u_C$ et $i = \dfrac{dq}{dt}$ donc $i = C \cdot \dfrac{du_C}{dt}$

On en déduit que la tension u_C vérifie l'équation différentielle :

$$E = u_C + R \cdot i \text{ soit } \frac{du_C}{dt} + \frac{1}{R \cdot C} \cdot u_C = \frac{E}{R \cdot C}$$

Si un circuit RC série est relié à un générateur délivrant une tension E, le condensateur se charge et la tension u_C à ses bornes vérifie l'équation différentielle suivante :

$$\frac{du_C}{dt} + \frac{1}{R \cdot C} \cdot u_C = \frac{E}{R \cdot C}$$

Résolution

Cette équation différentielle linéaire du premier ordre admet les solutions de la forme :

$$u_C(t) = A \cdot e^{\alpha \cdot t} + B \text{ où } A, B \text{ et } \alpha \text{ sont des constantes.}$$

À l'instant $t = 0$, la tension u_C est nulle car le condensateur est déchargé. L'équation précédente devient :

$$u_C(0) = A \cdot e^{\alpha \cdot 0} + B \leftrightarrow 0 = A + B \leftrightarrow B = -A$$

L'équation $u_C(t)$ s'écrit alors : $u_C(t) = A \cdot e^{\alpha \cdot t} - A$

Pour déterminer ces constances, on reporte cette expression dans l'équation différentielle précédente :

$$A \cdot \left(\alpha + \frac{1}{R \cdot C}\right) \cdot e^{\alpha \cdot t} - \frac{A}{R \cdot C} = \frac{E}{R \cdot C} \text{ d'où } A \cdot \left(\alpha + \frac{1}{R \cdot C}\right) \cdot e^{\alpha \cdot t} = 0 \text{ et } -\frac{A}{R \cdot C} = \frac{E}{R \cdot C}$$

On en déduit que $\alpha = -\dfrac{1}{R \cdot C}$ et $A = -E$.

On reporte ces résultats dans l'expression de $u_C(t)$ précédente :

$$u_C(t) = -E \cdot e^{-\frac{1}{R \cdot C}t} + E \text{ soit } u_C(t) = E \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{R \cdot C}t}\right)$$

Cette expression correspond à une fonction croissante (FIG. 8)

Dans un circuit RC série, la tension aux bornes du condensateur augmente progressivement jusqu'à la valeur imposée par le générateur.

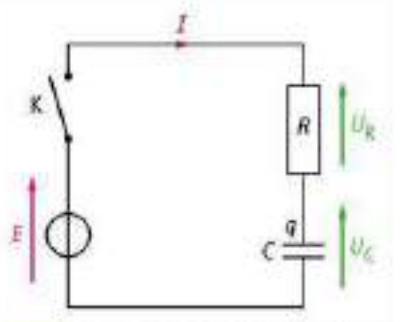


FIG. 7 Circuit RC afin d'étudier la charge du condensateur.



Une animation sur la réponse d'un circuit RC.

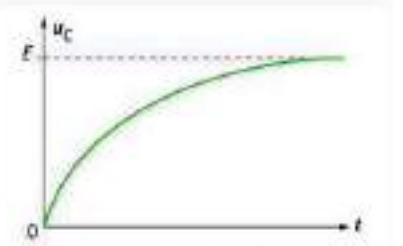


FIG. 8 Évolution de la tension aux bornes du condensateur.

VOCABULAIRE

Dans l'intervalle où la tension u_C aux bornes du condensateur varie, on parle de **régime transitoire**. Lorsque la tension u_C atteint la valeur E et ne varie plus, on parle de **régime permanent**.

Décharge d'un condensateur

Mise en équation

On considère un circuit RC série pour lequel le condensateur est initialement chargé (FIG. 9).

Lorsque l'interrupteur est fermé à l'instant $t = 0$, le condensateur est chargé et la tension u_C à ses bornes est donc égale à E. Elle diminue ensuite progressivement au fur et à mesure de la décharge du condensateur.

Si un circuit RC série dans lequel le condensateur est initialement chargé, le condensateur se décharge progressivement et la tension u_C à ses bornes vérifie l'équation différentielle suivante :

$$\frac{du_C}{dt} + \frac{1}{R \cdot C} u_C = 0$$

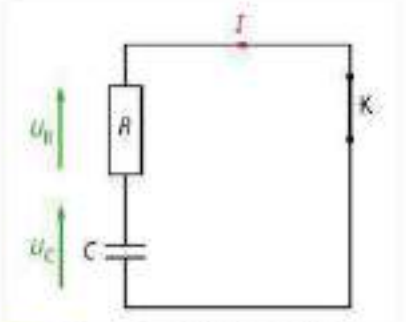


FIG. 9 Circuit RC afin d'étudier la décharge du condensateur.

Résolution

Cette équation différentielle linéaire du premier ordre se résout de la même manière que précédent. On obtient : $\alpha = -\frac{1}{R \cdot C}$; $A = E$ et $B = 0$.

On en déduit que $u_C(t) = E \cdot e^{-\frac{1}{R \cdot C} \cdot t}$

Cette expression correspond à une fonction décroissante (FIG. 10).

Dans un circuit RC série, la tension aux bornes du condensateur chargé diminue progressivement jusqu'à s'annuler.

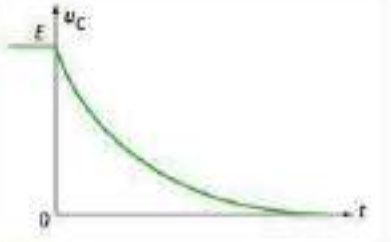


FIG. 10 Évolution de la tension aux bornes du condensateur.

Constante de temps d'un circuit RC

Le produit R · C apparaît dans les expressions de $u_C(t)$ établies précédemment.

Le produit R · C est appelé **constante de temps** du circuit RC série, il est généralement noté τ. Il est homogène à un temps et s'exprime en seconde (s).

La valeur de la constante de temps τ, permet d'évaluer la durée de charge ou de décharge du condensateur. On considère qu'un condensateur est totalement chargé ou déchargé au bout de 5 τ.

EXEMPLE

On étudie la charge d'un circuit RC avec $R = 10$ kΩ et $C = 1{,}0$ µF (courbe verte – FIG. 11).

La constante de temps vaut :

$\tau = R \cdot C = 10 \times 10^3 \cdot 1{,}0 \times 10^{-6} = 10 \times 10^{-3}$ s $= 10$ ms.

On peut dire que le condensateur sera totalement chargé au bout de 50 ms.

La durée de charge ou de décharge d'un condensateur ne dépend que de la valeur de la résistance et de la capacité.

Plus la valeur de la constante de temps τ est grande, plus la durée de charge ou de décharge du condensateur augmente (FIG. 11).

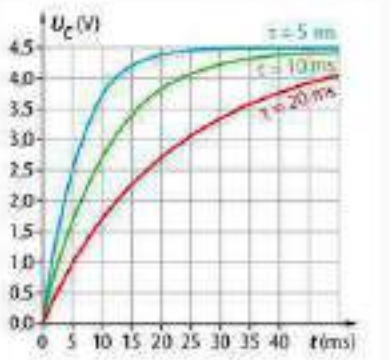


FIG. 11 Influence de la constante de temps sur la charge d'un condensateur.

Il est possible de déterminer graphiquement la valeur de τ de deux manières différentes (FIG. 12) :

- on calcule $u_C(\tau)$ puis on lit graphiquement l'abscisse τ ;
- on trace le point d'intersection de la tangente à l'origine de $u_C(t)$ et son asymptote horizontale, l'abscisse de ce point est τ.

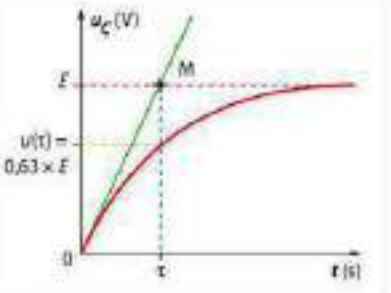
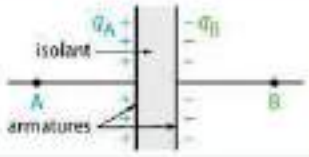


FIG. 12 Détermination graphique de la constante de temps.

1 Le modèle du condensateur

Un **condensateur** est composé de deux armatures chargées électriquement et d'un isolant.

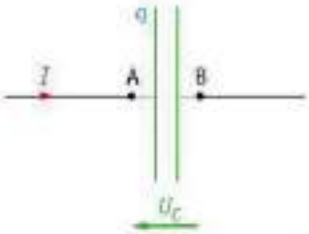


La charge électrique q stockée par le condensateur est liée à l'intensité I du courant qui traverse le condensateur et à la tension u à ses bornes :

$$i = \frac{dq}{dt} \qquad q = C \cdot u$$

i : intensité du courant (A) ; q : charge électrique (C) ; C : capacité du condensateur (F) ; u : tension (V)

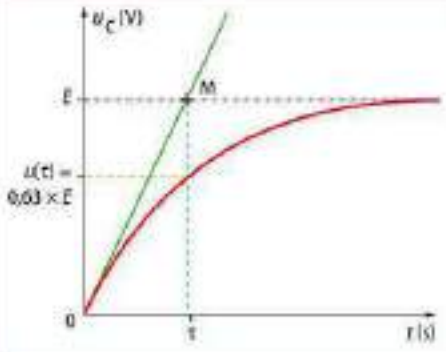
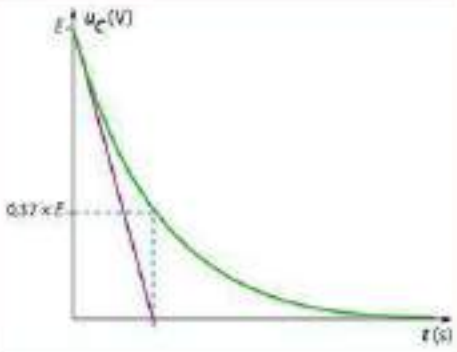
La **capacité** d'un condensateur dépend de sa géométrie et sa structure. Cette propriété explique le fonctionnement des **capteurs capacitifs**.



Le **comportement capacitif** d'un dipôle se traduit par une avance de phase de l'intensité sur la tension à ses bornes.

2 Le modèle du circuit RC série

Un **circuit RC série** est caractérisé par un régime transitoire au cours duquel le condensateur se charge ou se décharge progressivement.

	Modélisation de la charge du condensateur	Modélisation de la décharge du condensateur
Équation différentielle	$\frac{du_C}{dt} + \frac{1}{R \cdot C} u_C = \frac{E}{R \cdot C}$	$\frac{du_C}{dt} + \frac{1}{R \cdot C} \cdot u_C = 0$
Solution	Si pour $t = 0$, $u_C = 0$, alors : $u_C(t) = E \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}}\right)$	Si pour $t = 0$, $u_C = E$, alors : $u_C(t) = E \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}}$
Représentation graphique		

La **constante de temps** τ d'un condensateur se mesure en farad (symbole F) et permet d'évaluer l'ordre de grandeur de la durée de charge ou de décharge. Elle est égale à :

$$\tau = R \cdot C$$

τ : temps caractéristique (s) ; C : capacité du condensateur (F) ; R : résistance (Ω)

Vérifier l'essentiel

Pour chaque question, choisir la ou les bonnes réponses. ➡ SOLUTIONS EN PAGE 593

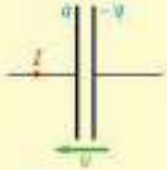
Flash PAGE corrigés détaillés

Flash PAGE QCM interactifs

1 Le modèle du condensateur

	A	B	C
1 Un condensateur est un dipôle :	constitué de deux armatures isolantes.	qui comporte deux armatures conductrices séparées par un isolant.	dont les deux armatures sont en contact.
2 Un condensateur est un dipôle :	qui s'oppose au passage du courant.	qui peut stocker des charges électriques sur ses armatures.	dont la charge d'une des armatures reste toujours nulle.

On considère le condensateur de capacité C schématisé ci-contre :

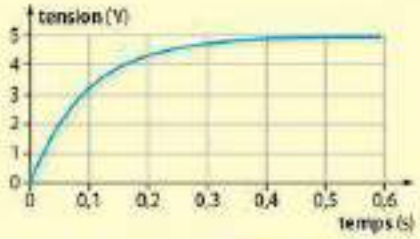


	A	B	C
3 La charge portée par l'armature B est :	positive.	négative.	nulle.
4 La charge portée par l'armature A s'écrit :	$\frac{C}{u}$	$\frac{u}{C}$	$C \cdot u$
5 L'intensité du courant s'écrit :	$i = C \cdot \frac{du}{dt}$	$i = -\frac{dq_A}{dt}$	$i = -C \cdot \frac{du}{dt}$

2 Le modèle du circuit RC série

	A	B	C
6 Lors de la charge d'un condensateur, la tension à ses bornes :	tend vers 0.	augmente.	reste constante.
7 La durée de charge d'un condensateur dépend :	de la valeur de sa capacité C.	de la valeur de la résistance R du circuit.	de la valeur de la tension délivrée par le générateur.
8 Avec $R = 10\ k\Omega$ et $C = 100\ nF$, l'ordre de grandeur du temps caractéristique du circuit vaut :	$\tau = 10^{3}$ s.	$\tau = 10^{-3}$ s.	$\tau = 10^{1}$ s.

On enregistre la tension aux bornes d'un condensateur lors de sa charge par une tension continue.



	A	B	C
9 La durée nécessaire pour charger le condensateur :	ne dépend que de la valeur de la capacité C du condensateur.	dépend à la fois de la résistance R et de la capacité C.	ne dépend que de la valeur de la résistance R du conducteur ohmique.
10 Le temps caractéristique de ce circuit RC vaut :	0,1 s.	0,5 s.	20 ms.

Acquérir les bases

1 Le modèle du condensateur

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Modèle du condensateur
- Identifier des situations d'accumulation de charges sur des surfaces en regard.
- Identifier le comportement capacitif d'un dipôle.
- Relier l'intensité du courant électrique au débit de charges.
- Décrire et exploiter le modèle du condensateur.

Acquérir les bases : 9 S'entraîner : 17

Capacité d'un condensateur
- Relier la charge accumulée à la tension aux bornes du condensateur.
- Citer les ordres de grandeur de valeurs de capacités usuelles.
- Expliquer le principe de fonctionnement des capteurs.

Acquérir les bases : 10 S'entraîner : 22 23

9 Plumeau dépoussiérant



Au rayon des articles ménagers, il est courant de trouver des plumeaux dépoussiérants. Ils sont constitués de fibres plastiques synthétiques souples qui doivent être secouées dans l'air avant utilisation.

Expliquer pourquoi le principe de fonctionnement de ces plumeaux repose sur une accumulation de charges électriques.

10 Électrisation par frottement

Quand deux surfaces sont frottées l'une contre l'autre, elles se chargent électriquement.

Ainsi une tige en verre se charge positivement lorsqu'on la frotte avec un tissu de laine. Cette tige de verre est alors capable d'attirer un barreau d'ébonite préalablement frotté avec un morceau de fourrure qui lui-même pourra repousser un tube en PVC frotté avec un tissu de laine.

1. Schématiser les trois situations décrites ci-dessus en faisant apparaître les charges accumulées.

2. Expliquer pourquoi certains matériaux se repoussent et d'autres s'attirent dans les expériences proposées.

11 Formation des éclairs

Pour expliquer la formation des éclairs, il est courant de s'appuyer sur le schéma ci-dessous.



1. Préciser la signification des signes + et – représentés sur ce schéma.

2. Proposer une explication à l'apparition d'éclair en termes d'accumulation de charges électriques.

12 Carillon électrostatique

On utilise deux plaques métalliques, parfois en forme de cloches, reliées à un générateur délivrant une forte tension. Ces deux plaques sont séparées par environ 1 cm d'air.

1. Schématiser le dispositif en faisant apparaître l'accumulation des charges de signes opposés sur des surfaces en regard.



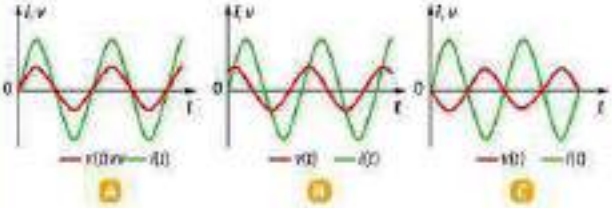
On place entre les deux plaques un pendule constitué d'une petite boule recouverte d'un matériau conducteur suspendue à un fil isolant. La boule est alors attirée par la plaque la plus proche puis se met à osciller en cognant alternativement chaque plaque ce qui explique le nom donné à cette expérience : le carillon électrostatique.

2. Expliquer, en vous appuyant sur un schéma, pourquoi la boule est au départ attirée par la plaque dont elle est la plus proche ?

3. Expliquer en vous appuyant sur des schémas, pourquoi la boule oscille ensuite entre chaque plaque ?

13 Différences de phase

On représente ci-dessous l'évolution de la tension et de l'intensité du courant pour différents dipôles.



Déterminer si les affirmations sont vraies ou fausses en argumentant votre choix.

1. Pour le dipôle A, l'intensité du courant $i(t)$ et la tension $u(t)$ ne sont pas en phase.

2. Pour le dipôle B, l'intensité du courant $i(t)$ et en avance de phase sur la tension $u(t)$.

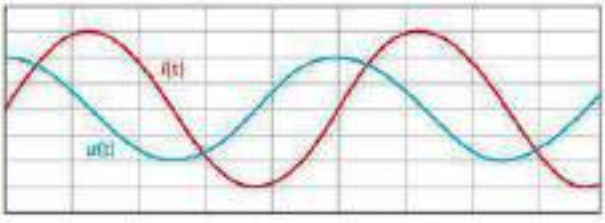
3. Le dipôle B a un comportement capacitif.

4. Pour le dipôle C, l'intensité du courant $i(t)$ et la tension $u(t)$ sont en phase.

14 Comportement capacitif

On alimente un dipôle à un générateur de tension variable sinusoïdale. À l'aide d'un dispositif d'acquisition de donnée, on mesure la tension aux bornes de ce dipôle et l'intensité du courant qui la traverse.

On obtient les résultats expérimentaux ci-dessous.



1. Représenter le schéma de ce circuit électrique.

2. Ce dipôle a-t-il un comportement capacitif ?

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

15 Armatures chargées

Un condensateur possède deux armatures A et B. L'armature A porte une charge électrique $q_A = 4{,}8$ µC.

1. Que vaut la charge électrique portée par l'armature B ?

2. a. L'armature B possède-elle un excès ou un défaut d'électrons ?
b. Lequel de ces schémas représente correctement l'état électrique de ce condensateur ?



A B C

3. Déterminer le signe de la tension u_{AB} entre les deux armatures.

16 Load and voltage



A ceramic capacitor with a capacitance of 10 nF is charged at as voltage of 6.0 V.

What is the load carried by each of its frames?

17 Capacité d'un condensateur

Un condensateur initialement déchargé est relié à un courant d'intensité constante I égale à 12 mA.

Au bout d'une minute, la tension aux bornes de ce condensateur vaut 1,5 V.

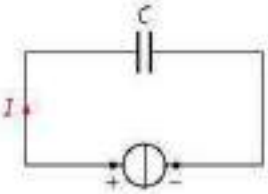


1. a. Calculer la valeur de la capacité de ce condensateur.
b. Ce résultat est-il cohérent avec la photographie ci-contre ?

2. Est-ce une valeur courante pour un condensateur ?

18

On réalise le circuit schématisé ci-contre afin de chargé un condensateur de capacité C avec un générateur de courant d'intensité constante $I = 1{,}0$ mA.



On mesure la tension aux bornes du condensateur avec un voltmètre à différents instants. On obtient les résultats suivants.

t (en s)	0	10	20	30	40	60
u_C (en V)	0	23	51	76	98	152

1. Reproduire le schéma du circuit électrique en faisant apparaître le voltmètre permettant la mesure de u_C et de l'intensité du courant délivré par le générateur.

2. a. Représenter le graphique des variations de u_C en fonction du temps.
b. Quelle information apporte ce graphique ?
c. En déduire la valeur de la capacité du condensateur utilisé.

19 Durée de charge maximale

Un condensateur porte les indications suivantes :

tension de service 42 V – capacité 330 µF

Il est chargé par un générateur de courant qui délivre une intensité de 2,0 mA.

Que vaut la durée de charge maximale qui permet de rester dans la limite de fonctionnement du composant ?

2 Modèle du circuit RC série

EN AUTONOMIE

Ce qu'on attend de moi le jour du BAC

Modèle du circuit RC

- Établir l'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes d'un condensateur lors de sa charge et de sa décharge.
- Résoudre l'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes d'un condensateur lors de sa charge et de sa décharge.
- Exploiter graphiquement la réponse d'un circuit RC.

→ Acquérir les bases : 22 → S'entraîner : 27

Constante de temps

- Énoncer la définition de la constante de temps d'un circuit RC série, la calculer et l'exploiter.

→ Acquérir les bases : 22 → S'entraîner : 27

20 Tension aux bornes d'un condensateur

La tension aux bornes d'un condensateur dans un circuit RC série s'écrit :

$$u_C(t) = E \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}}\right)$$

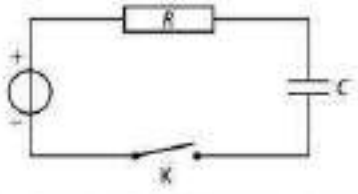
1. Expliquer quelle est la signification de chacun des termes présents dans cette équation et leur unité.

2. a. Pourquoi peut-on dire que u_C est une fonction du temps ?
b. Que vaut u_C lorsque $t = 0$? lorsque t devient très grand ?

3. Cette expression de $u_C(t)$ correspond-elle à charge ou à la décharge du condensateur ?

21 Charge d'un condensateur

On considère le circuit schématisé ci-dessous où le condensateur est déchargé. À l'instant initial, on ferme l'interrupteur.



1. Reproduire le schéma en indiquant le sens du courant et en représentant les tensions E, u_R et u_C.

2. a. Que vaut la tension $u_C(t=0)$ à l'instant initial ?
b. Même question lorsque le condensateur sera totalement chargé.

3. Établir l'équation différentielle vérifiée par $u_C(t)$.

4. La solution de cette équation différentielle s'écrit :

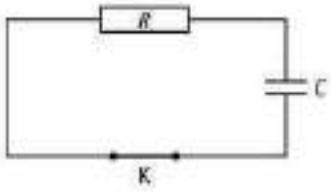
$$u_C(t) = A + B \cdot e^{-C \cdot t}$$

Déterminer les expressions des constantes A, B et C en utilisant les valeurs de u_C à l'instant initial est lorsque le condensateur est totalement chargé.

5. Vérifier que l'expression de u_C ainsi obtenue est bien solution de l'équation différentielle de la question 3.

22 Décharge d'un condensateur

On considère le circuit schématisé ci-contre où le condensateur est initialement chargé tel que la tension aux bornes du condensateur vaut E.



À l'instant initial, on ferme l'interrupteur et on étudie la décharge du condensateur.

Données : $E = 9{,}0\,V$; $R = 2{,}2\,k\Omega$; $C = 470\,\mu F$

1. a. Rappeler les relations entre u_C et i et u_R et i.
b. En déduire l'équation différentielle vérifiée par $u_C(t)$.

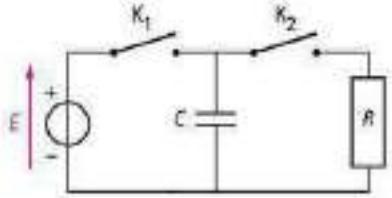
2. Montrer que la fonction $u_C(t) = E \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}}$ est solution de cette équation différentielle.

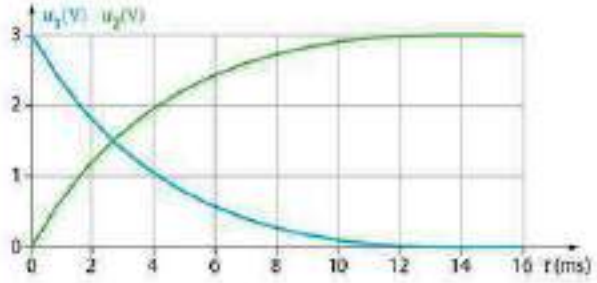
3. a. Vers quelle limite tend $u_C(t)$ lorsque t temps vers l'infini ?
b. Estimer la durée nécessaire pour atteindre cette valeur limite à partir du calcul de la valeur du temps caractéristique τ.
c. Représenter l'allure de la courbe $u_C(t)$.

23 Réponse d'un circuit RC

On réalise un circuit RC série et on procède à la charge puis à la décharge du condensateur.

Un dispositif d'acquisition informatisé permet d'enregistrer les variations de u_C en fonction du temps. On obtient les résultats suivant.





Données : $R = 3{,}3\,k\Omega$ et $C = 60\,\mu F$

1. Reproduire le schéma du circuit en indiquant le sens du courant, la tension u_C ainsi que les bornes de connexion du dispositif d'acquisition.

2. a. Que vaut la tension E délivrée par le générateur ?
b. Identifier quelle courbe correspond à la charge et à la décharge du condensateur.

3. a. Déterminer graphiquement la valeur du temps caractéristique τ de ce circuit.
b. Ce résultat est-il cohérent avec les valeurs de R et de C données ?

Faire le point avant d'aller plus loin

PRÉPA BAC

Pour vérifier ses connaissances, répondre aux questions suivantes (sans regarder le cours !)

- Citer les différents éléments qui constituent un condensateur.
- Énoncer le lien entre débit de charge et intensité du courant électrique.
- Identifier des exemples du quotidien où il y a accumulation de charges de signes opposés sur des surfaces en regard.
- Citer des ordres de grandeur de valeurs de capacités usuelles.
- Nommer les grandeurs et les unités dans la relation : $q = C \cdot u$
- Expliquer le principe de fonctionnement de quelques capteurs capacitifs.
- Montrer que l'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes d'un condensateur dans le cas de sa charge s'écrit : $\frac{du_C}{dt} + \frac{1}{RC}u_C = \frac{E}{RC}$
- Rappeler l'expression du temps caractéristique du circuit RC série.

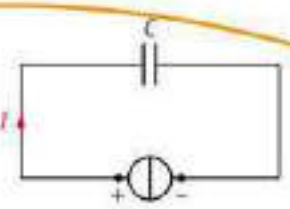
Retrouver ces questions en version numérique — Flash PAGE cartes mémos

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

Exercice résolu EN AUTONOMIE

24 Capacité d'un condensateur

On réalise le circuit schématisé ci-contre afin de chargé un condensateur de capacité C avec un générateur de courant d'intensité constante $I = 1{,}0$ mA.



On mesure la tension aux bornes du condensateur avec un voltmètre à différents instants. On obtient les résultats suivants.

Δt (en s)	0	10	20	30	40	60
u_C (en V)	0	23	51	76	98	152

1. Reproduire le schéma du circuit électrique en indiquant les positions des instruments permettant la mesure de la tension aux bornes du condensateur et de l'intensité du courant délivré par le générateur.

2. **Exprimer** la tension u_C aux bornes du condensateur en fonction de I, C et Δt.

3. a. **Représenter** le graphique des variations de u_C en fonction du temps.
b. **Confronter** le graphique obtenu au modèle mathématique précédent.
c. En déduire la valeur de la capacité du condensateur utilisé.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- Le générateur délivre une intensité qui ne varie pas au cours du temps, le **débit de charge** dans le circuit est donc constant.
- Le **voltmètre** et l'**ampèremètre** sont des instruments courant du laboratoire de physique.
- Les valeurs de u_C sont reportées sur l'axe des **ordonnées** et le temps sur celui des **abscisses**.

LES VERBES D'ACTION

- **Exprimer** : écrire une grandeur sous forme littérale.
- **Représenter** : réaliser un dessin symbolique en respectant une convention.
- **Confronter** : porter un regard critique sur la comparaison de résultats.

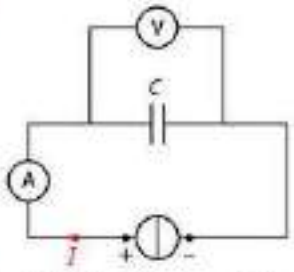
QUELQUES CONSEILS

1. Le voltmètre se branche en dérivation et l'ampèremètre en série.

2. En courant continu, la dérivée se traduit par une différence :
$i = \dfrac{dq}{dt}$ devient en continu $I = \dfrac{q}{\Delta t}$

EXEMPLE DE RÉDACTION

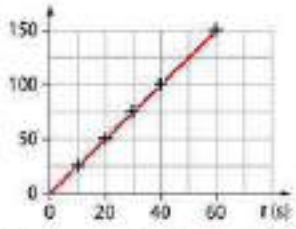
1.



2. La définition de la capacité permet d'écrire $q = C \cdot u_C$ et comme le générateur d'intensité est continue, le débit de charges s'écrit : $I = \dfrac{q}{\Delta t}$
On en déduit :

$$I = \frac{C \cdot u_C}{\Delta t} \text{ ; d'où : } u_C = \frac{I \cdot \Delta t}{C}$$

3. a.



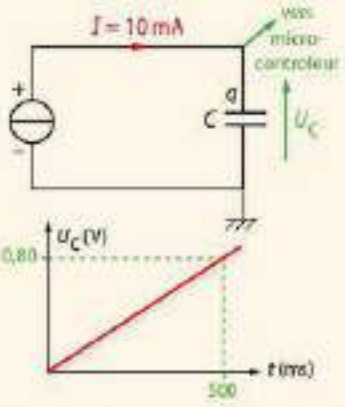
b. D'après la question 2., u_C est proportionnel à Δt. Ce résultat est cohérent avec le graphique obtenu qui est une droite qui passe par l'origine.
c. D'après les réponses précédentes, le coefficient directeur de la droite obtenue est égal à I/C :

$$\frac{I}{C} = \frac{125}{50} = 2{,}5 \text{ d'où } C = \frac{I}{2{,}5} = \frac{1{,}0 \times 10^{-3}}{2{,}5} = 4{,}0 \times 10^{-4}\ \text{F} = 400\ \mu\text{F}$$

EXERCICE SIMILAIRE

25 Charge d'un condensateur à intensité constante

Afin d'évaluer la capacité d'un condensateur, on réalise le circuit ci-contre où le générateur débite un courant d'intensité constante. Un microcontrôleur permet d'enregistrer la tension u_C en fonction du temps.



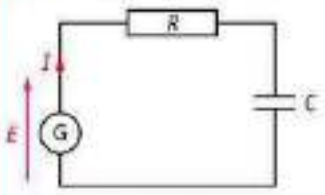
1. Écrire la relation entre l'intensité I du courant, la charge q portée par l'armature du condensateur et la durée de charge Δt.

2. Écrire la relation entre la charge électrique q, la capacité C du condensateur et la tension u_C.

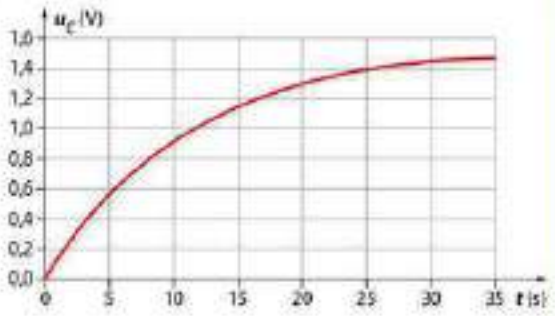
3. a. Calculer la valeur de la charge électrique q portée par l'armature pour une durée de 500 ms.
b. En déduire la valeur de la capacité C du condensateur utilisé.

Exercice résolu EN AUTONOMIE

26 Charge d'un condensateur et constante de temps



On étudie à partir du circuit ci-contre la charge d'un condensateur couramment utilisé pour réaliser des filtres audio. On enregistre les valeurs de la tension u_C aux bornes du condensateur :



1. **Établir** l'équation différentielle vérifiée par u_C lors de la charge du condensateur.

2. La solution de cette équation est : $u_C(t) = E \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$.

a. Établir l'expression de τ et montrer que τ est homogène à un temps.

b. **En déduire** la valeur de τ.

3. Déterminer graphiquement la valeur de τ et comparer à la valeur calculée.

Données : $R = 1{,}0\ M\Omega$; $C = 10\ \mu F$; $E = 1{,}5\ V$.

LES CLÉS DE L'ÉNONCÉ

- Les **lois de l'électricité** appliquées au circuit étudié conduisent à l'équation différentielle.
- L'homogénéité d'une grandeur est établie à partir d'une **analyse dimensionnelle**.

LES VERBES D'ACTION

- **Établir** : mettre en œuvre une stratégie pour trouver un résultat.
- **Déduire** : utiliser le résultat précédent pour répondre.

QUELQUES CONSEILS

1. L'équation différentielle est obtenue en éliminant q et i dans l'écriture de la loi des mailles.
2. Le produit de deux termes est nul si au moins un de deux terme et nul.
3. Commencer par identifier la valeur finale de u_C.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. La loi des mailles dans le circuit s'écrit : $E = u_R + u_C$

Comme $q = C \cdot u_C$; $i = \frac{dq}{dt}$ et $u_R = R \cdot i$ on a :

$$E = R \cdot C \cdot \frac{du_C}{dt} + u_C$$

2. Pour établir l'expression de τ, on introduit la solution $u_C(t)$ donnée dans l'équation différentielle précédente :

$$E = R \cdot C \cdot \frac{E}{\tau} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + E - E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$0 = E \cdot \left(\frac{R \cdot C}{\tau} - 1\right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\tau = R \cdot C$$

La définition de la capacité permet d'écrire $q = C \cdot u_C$ et comme le générateur d'intensité est continue, le débit de charges s'écrit : $I = q / \Delta t$.

On en déduit :

$$I = \frac{C \cdot u_C}{\Delta t} \text{ d'où } u_C = \frac{I \cdot \Delta t}{C}$$

Analyse dimensionnelle

On a $q = C \cdot u_C$

donc $\dim C = \frac{\dim q}{\dim u} = \frac{I \cdot T}{\dim u}$

et $\dim R = \frac{\dim u}{I}$

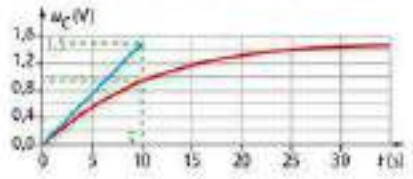
d'où

$$\dim \tau = \dim R \cdot C = \frac{\dim u}{I} \cdot \frac{I \cdot T}{\dim u} = T$$

La grandeur τ est homogène à une durée.

b. $\tau = R \cdot C = 1{,}0 \times 10^6 \times 10 \times 10^{-6} = 10\ s$

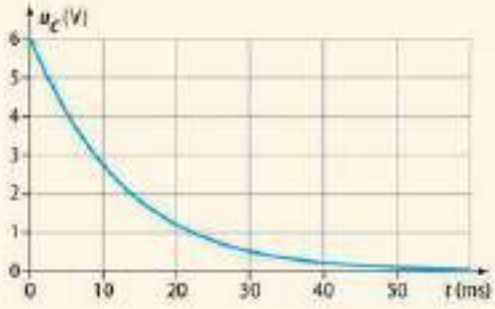
3. On utilise une des deux méthodes graphiques : tracé de la tangente à l'origine ou 63 % de la valeur finale.



EXERCICE SIMILAIRE

27 Décharge d'un condensateur et constante de temps

On étudie la décharge d'un condensateur chargé dans un conducteur ohmique de résistance R. La capacité du condensateur est notée C. La tension u_C aux bornes du condensateur est mesurée en fonction du temps (graphique ci-contre).



1. Représenter le schéma du circuit utilisé.

2. Montrer que l'équation différentielle vérifiée par la tension u_C peut s'écrire : $u_C + \tau \cdot \frac{du_C}{dt} = 0$ avec la constante de temps $\tau = R \cdot C$.

3. a. Déterminer la valeur de la constante de temps τ.

b. En déduire la valeur de la capacité C du condensateur.

Exercices de numéro bleu : solutions en fin de manuel, corrigés détaillés en version numérique

S'entraîner pour maîtriser

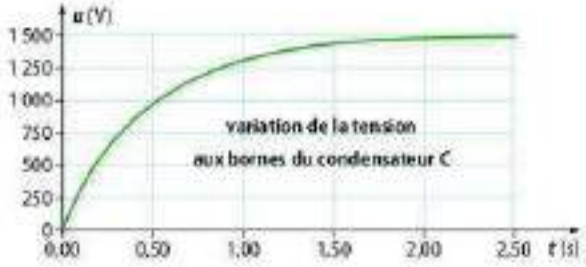
SAVOIR RÉDIGER

28 Proposer une correction de la solution proposée par un élève à l'énoncé.

Énoncé

Le défibrillateur cardiaque est un appareil utilisé en médecine d'urgence. Il permet d'appliquer un choc électrique sur le thorax d'un patient, en cas de fibrillation cardiaque. Le défibrillateur cardiaque peut être représenté de façon simplifiée par un condensateur.

Lors de la mise en fonction du défibrillateur, le manipulateur obtient la charge du condensateur C représentée par la courbe ci-dessous.



1. Quelle tension délivre le générateur lors de la charge du défibrillateur ? Quelles précautions faut-il envisager ?

2. Déterminer la valeur de la constante de temps τ du circuit modélisant le défibrillateur lors de sa charge.

3. a. Si l'on considère qu'un condensateur est chargé lorsque la tension entre ses bornes atteint 97 % de la tension maximale, au bout de quelle durée Δt le condensateur sera-t-il chargé ?

b. Comparer cette durée à la valeur habituellement admise de $5 \cdot \tau$.

Solution proposée par un élève

1. La tension délivrée par le générateur vaut 1 500 V. C'est une tension élevée.) Justifier en vous appuyant sur le graphique

2. Sur le graphique, on cherche la durée pour laquelle on a 63 % de la tension maximale.

On trouve τ = 0,5 s.

3. a. On fait 0,97 × 1 500 = 1 455 V ce qui correspond à 2,5 s.) Attention aux chiffres significatifs

b. On a $5 \cdot \tau$ = 5 × 0,5 = 2,5 s. C'est le même résultat) Argumentation à développer

29 La bouteille de Leyde HISTOIRE DES SCIENCES

La bouteille de Leyde est considérée comme l'ancêtre du condensateur. Elle est formée d'une électrode supérieure reliée à des feuilles d'or froissées à l'intérieur d'une bouteille en verre. Une deuxième électrode est une feuille métallique en étain enveloppant l'extérieur de la bouteille. Reliée à un générateur, la bouteille de Leyde peut accumuler des charges électriques.



1. Schématiser une bouteille de Leyde en indiquant les éléments qui jouent le rôle des armatures.

Le tableau ci-dessous regroupe les mesures de la tension électrique u_C aux bornes d'une bouteille de Leyde en fonction de la charge q portée par son armature positive.

u_C (V)	0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0
q ($\times 10^{-9}$ C)	0	1,9	4,2	6,1	7,9	10,1

2. a. Tracer et modéliser la courbe des variations de q en fonction de u_C.

b. En déduire la relation numérique entre la tension u_C et la charge q.

3. Déterminer la valeur de la capacité C du condensateur équivalent à cette bouteille de Leyde.

30 Simulation d'un comportement capacitif

Le programme Python ci-contre permet de simuler le tracé de deux fonctions qui représentent l'intensité du courant qui traverse un dipôle, et la tension à ses bornes, lorsqu'il est alimenté par un GBF.

1. Exécuter ce programme et déterminer si $i(t)$ est en avance de phase ou en retard par rapport à $u(t)$.

2. Proposer une modification de ce programme pour obtenir un graphique qui correspondrait à un dipôle qui aurait un comportement capacitif.

```
#définition des bibliothèques
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from math import sin,pi

#définition de l'abscisse
t=np.linspace(0,4*pi,2000)

#définition des fonctions
u=[0.8*sin(1.2*x) for x in t]
i=[0.5*sin(1.2*x-0.8) for x in t]

#Courbes à tracer
plt.plot(t,u)
plt.plot(t,i)

#Mise en forme du graphique
plt.legend(['u(t)', 'i(t)'])
plt.xlabel('t(en s)')
plt.ylabel('u(en V) et i(mA)')
plt.grid()

plt.show
```

31 Modéliser la foudre



Les cumulonimbus sont des nuages bien connus. Lors des orages, ils sont fortement chargés électriquement : le sommet du nuage est plutôt chargé positivement alors que sa base est négative. Il en résulte que le sol se charge positivement par influence.

Par temps d'orage, on peut comparer le système {base du nuage – sol} à un gigantesque condensateur constitué par de l'air placé entre le bas du nuage et le sol.

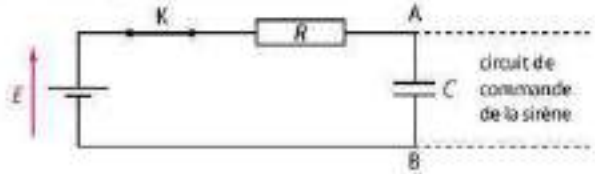
Données : *ordres de grandeur de $R = 1\ k\Omega$ et $C = 10\ nF$*

1. a. Expliquer en quoi la situation précédente peut-être modélisée par un condensateur ? Préciser en particulier ce qui jouerait le rôle des armatures et de l'isolant.
b. Expliquer l'origine de la charge positive du sol.

2. Il est possible de modéliser l'apparition de la foudre par la décharge de ce condensateur dans un conducteur ohmique. Représenter le schéma du circuit électrique qui modélise cette situation.

32 Système d'alarme

Lorsque l'on rentre dans un logement sous alarme, il faut disposer d'une durée suffisante pour désactiver le dispositif sans qu'il se déclenche. Pour cela certains dispositifs utilisent la charge d'un condensateur. La situation est alors modélisée par le circuit ci-dessous.



L'ouverture de la porte du logement à l'instant initial déclenche la charge du condensateur. Le circuit de commande déclenche la sirène dès que le condensateur est chargé.

Données : $R = 47\ k\Omega$; $C = 1{,}1 \times 10^{3}\ \mu F$; $E = 9{,}0\ V$

DÉMARCHE AVANCÉE

Évaluer la durée dont dispose l'utilisateur pour désactiver le système d'alarme et commenter.

DÉMARCHE ÉLÉMENTAIRE

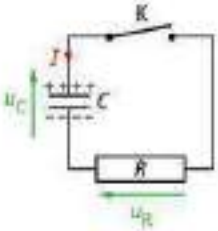
1. Calculer la constante de temps τ de ce circuit.
2. À partir de combien de τ peut-on considérer qu'un condensateur est chargé ? En déduire la durée dont dispose l'utilisateur pour désactiver l'alarme.
3. Cette durée vous semble-t-elle suffisante ?

33 Lampe secouée



Avec les lampes de poche « sans pile », l'utilisateur doit secouer la lampe pendant une trentaine de secondes pour produire de l'énergie électrique qui est stockée dans un condensateur.

Le fonctionnement de cette lampe peut être modélisé par la décharge d'un condensateur C dans un conducteur ohmique de résistance R. À $t_0 = 0$ s, la tension aux bornes du condensateur vaut $U_0 = 3{,}6$ V. À la fermeture de l'interrupteur K, la décharge débute.



Données : $C = 1{,}0\ F$; $R = 220\ \Omega$; $U_0 = 3{,}6\ V$.

1. Établir l'équation différentielle vérifiée par $u_C(t)$ pendant la décharge et montrer qu'elle peut s'écrire sous la forme : $\frac{du_C}{dt} + \frac{1}{\tau} \cdot u_C = 0$ où $\tau = R \cdot C$ est la constante de temps.

2. Vérifier par une analyse dimensionnelle que la constante de temps τ est homogène à un temps.

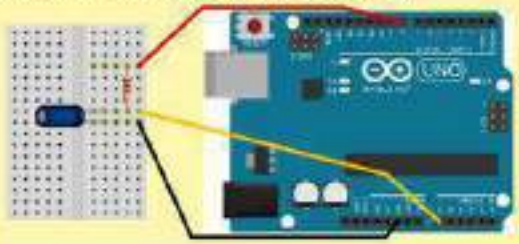
3. a. Montrer que $u(t) = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$ est solution de l'équation différentielle précédente.
b. En déduire qu'une durée environ égale à $5\,\tau$ permet une décharge quasi-complète du condensateur.

4. Évaluer la durée de fonctionnement de la lampe.

À L'ORAL

34 Microcontrôleur

On réalise le circuit schématisé ci-dessous.



```
int etat = 0;  // 0 au début, 1 pendant la charge

void setup() {
  pinMode(8, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);

    digitalWrite(8,LOW);       // décharge initiale
     du condensateur
  delay(2000);
    etat = 1;  // charge du condensateur
    digitalWrite(8,HIGH);
}
```

Préparer un exposé oral d'une durée de quelques minutes, afin de : présenter l'objectif de ce circuit ; justifier les choix de branchement qui ont été réalisés ; commenter l'extrait du programme permettant de réaliser les mesures attendues avec le microcontrôleur ; prévoir le résultat attendu.

Les mots-clés à utiliser
- condensateur
- charge électrique
- capacité
- circuit RC série
- temps caractéristique

35 RETOUR SUR LA PAGE D'OUVERTURE

Préparer un exposé oral qui explique le principe de fonctionnement d'un capteur capacitif exploité dans les systèmes micro-électromécaniques (accéléromètres, écrans tactiles, etc.).



PRÉPA BAC

Développer ses compétences

36 Titre de transport

RÉSOLUTION DE PROBLÈME

40 min

ANALYSER Faire des prévisions à l'aide d'un modèle

Aux heures de pointes des milliers de lycéens valident leur carte d'abonnement avant de prendre le bus.

DOC 1 Carte d'abonnement RFID

Dans la plupart des agglomérations, les cartes d'abonnement de transport en commun sont basées sur la technologie *Radio Frequency identification* (RFID). L'utilisateur présente sa carte devant la borne sans la sortir de son sac.

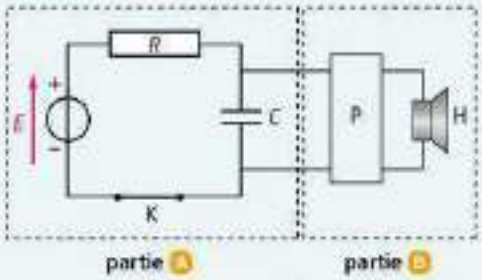
L'identification RFID nécessite :

- une étiquette comprenant une puce électronique reliée à une petite antenne et montée sur la carte de transport ;
- un lecteur qui se compose d'un scanner avec des antennes pour transmettre et recevoir les signaux de communication avec l'étiquette ;
- un microcontrôleur qui traite les données échangées.



DOC 2 Modélisation du dispositif

Le circuit d'une étiquette RFID d'une carte d'abonnement de transport en commun peut être modélisée par le circuit schématisé ci-dessous.



Le bobinage d'antenne de l'étiquette qui reçoit l'onde radio et dans lequel naît le courant est modélisé, par souci de simplification, par un générateur délivrant une tension E.

Le conducteur ohmique de résistance R représente la résistance de l'étiquette.

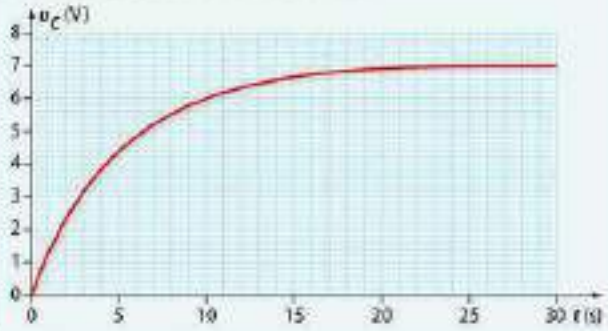
Lorsque le passe de l'usager est suffisamment proche du lecteur, un courant prend naissance dans le circuit, ce qui correspond à la fermeture de l'interrupteur K à la date $t_0 = 0$, et charge le condensateur de capacité C.

Quand la tension aux bornes du condensateur devient supérieure à une tension seuil, notée U_S, le composant électronique P (qui correspond au circuit intégré de réponse de l'étiquette) alimente le haut-parleur H qui émet un son. Le titre de transport est alors validé.



Circuit RFID à l'intérieur d'une carte.

DOC 3 Variation de la tension aux bornes du condensateur



QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. a. Reproduire le schéma de la partie A du circuit électrique (doc. 2) et indiquer le sens du courant ainsi que les tensions aux bornes du conducteur ohmique et du condensateur.

b. Montrer que l'équation différentielle vérifiée par la tension u_C aux bornes du condensateur s'écrit :

$$u_C + RC\frac{du_C}{dt} = E.$$

2. Vérifier que $u_C(t) = E(1 - e^{(-t/RC)})$ est bien solution de cette équation différentielle et en déduire l'expression littérale de la constante de temps τ du circuit ainsi que son unité par analyse dimensionnelle (FICHE MÉTHODE ➥ p. 544).

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

On constate que le composant électronique P n'alimente le haut-parleur H qu'au bout d'une durée égale à 2τ, que l'on appelle temps de réponse du circuit.

Peut-on dire que le temps de réponse du modèle est vraisemblable dans le cas de l'usage d'une carte d'abonnement de transport ?

Il est attendu une prise d'initiative et une présentation de la démarche suivie même si elle n'a pas abouti.

27 Stimulateur cardiaque

RÉSOLUTION DE PROBLÈME

30 min

VAL Confronter un modèle à des résultats expérimentaux

En France, environ 200 000 personnes portent un stimulateur cardiaque pour leur assurer un rythme cardiaque normal.

DOC 1 Fonctionnement d'un stimulateur cardiaque

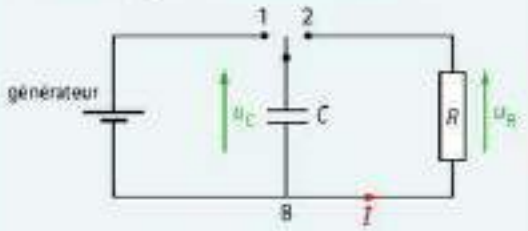
Un stimulateur cardiaque est un petit appareil généralement placé dans la poitrine pour aider à contrôler les rythmes cardiaques anormaux. Cet appareil utilise des impulsions électriques pour amener le cœur à battre à un rythme normal entre 70 et 80 battements par minute. En effet, le cœur possède son propre système électrique interne qui contrôle le rythme cardiaque : à chaque battement de cœur, un signal électrique se propage du haut du cœur vers le bas ce qui provoque la contraction du cœur et le pompage du sang.



Un stimulateur cardiaque se compose d'une batterie, d'un microcontrôleur associé à un dispositif électronique et de fils reliés à des électrodes. La batterie alimente le microcontrôleur que les fils et les électrodes relient au cœur.

DOC 2 Modélisation du circuit de stimulation

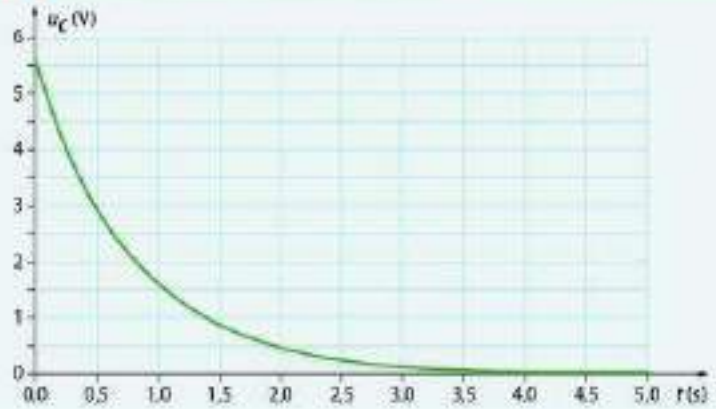
Le simulateur cardiaque peut être modélisé par le circuit électrique schématisé ci-dessous.



Le microcontrôleur, modélisé par l'interrupteur, permet la charge rapide du condensateur puis sa décharge dans un conducteur ohmique de résistance R élevée. Quand la valeur de la tension uR atteint une valeur seuil, le dispositif envoie au cœur au travers des électrodes une impulsion électrique.

L'interrupteur bascule à nouveau en position 1 ce qui permet une nouvelle charge du condensateur et la reprise du cycle de charge/décharge. La durée de ce cycle est égale au temps caractéristique du circuit RC série ainsi formé.

DOC 3 Étude du circuit de modélisation



DONNÉES

- Résistance du conducteur ohmique modélisant le circuit de décharge :
  $R = 2\ \text{M}\Omega$
- Capacité du condensateur modélisant le dispositif d'impulsions :
  $C = 4 \times 10^{-4}\ \text{mF}$

QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. a. Établir l'expression de la tension aux bornes du condensateur lors de sa décharge.

   b. En déduire l'expression du temps caractéristique τ en fonction de *R* et de *C* puis calculer sa valeur.

2. Montrer que le résultat précédent est cohérent avec le graphique expérimental du document 3.

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

Montrer que la durée au bout de laquelle un cycle du stimulateur cardiaque se reproduit est compatible avec une fréquence cardiaque normale.

Il est attendu une prise d'initiative et une présentation de la démarche suivie même si elle n'a pas abouti.

38 Sonde thermique

RÉSOLUTION DE PROBLÈMES

30 min

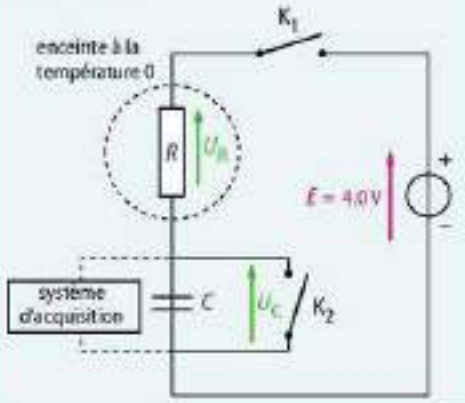
REA Utiliser un modèle

Les capteurs de température sont omniprésents dans les applications technologiques très courantes.

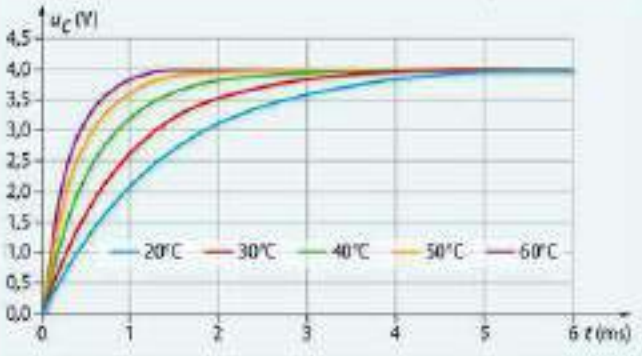
DOC 1 Modélisation d'un capteur de température

Un grand nombre de capteurs de mesure de température peuvent être modélisés par un circuit RC série. Dans le dispositif proposé :

- le condensateur a une capacité $C = 1{,}0\ \mu F$;
- le conducteur ohmique est une thermistance : la valeur R de sa résistance dépend de la température.
- la température, notée θ, est fixée par une enceinte isolée.
- un système d'acquisition permet d'enregistrer l'évolution au cours du temps de la tension u_C aux bornes du condensateur en fonction de θ.



DOC 3 Enregistrement de la tension u_C en fonction du temps pour différentes valeurs de la température θ



QUESTIONS PRÉLIMINAIRES

1. a. Rappeler l'expression du temps caractéristique τ du circuit étudié en fonction de R et C.
   b. Démontrer que $u_C(\tau) = 0{,}63 \times E$.
2. À l'aide du **document 2**, déterminer le temps caractéristique τ_{20} pour une température de 20 °C et en déduire que la résistance R_{20} correspondante vaut 1,3 kΩ.

LE PROBLÈME À RÉSOUDRE

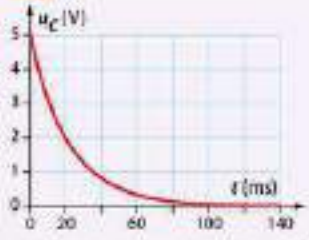
Pour ce type de capteur la courbe d'étalonnage s'écrit : $R = f(\theta)$.

Déterminer la température si la valeur de la résistance de la thermistance vaut 500 Ω.

Il est attendu une prise d'initiative et une présentation de la démarche suivie même si elle n'a pas abouti.

VERS LE SUP'

39 Supercondensateur



On étudie la décharge d'un condensateur dans un circuit RC série relié à un générateur de tension $E = 5{,}0$ V.

Une interface, reliée à un ordinateur, permet d'enregistrer les valeurs de la tension aux bornes du condensateur u_C en fonction du temps. On obtient le graphique ci-contre.

1. a. Démontrer que l'équation différentielle vérifiée par la tension u_C est de la forme :

$$u_C + \frac{1}{\alpha}\frac{du_C}{dt} = 0$$

b. Identifier le rapport $1/\alpha$ et préciser son unité.

2. La solution de l'équation différentielle précédemment établie est de la forme : $u_C = E \exp(-\alpha \cdot t)$.

Établir l'expression du logarithme népérien de sa valeur, notée $\ln(u_C)$.

3. On a tracé, à l'aide d'un logiciel, la courbe représentant $\ln(u_C)$ en fonction du temps.



a. Montrer que l'allure de cette courbe est en accord avec l'expression obtenue.

b. Avec laquelle des trois valeurs proposées pour le temps caractéristique τ, les résultats de la modélisation vous semblent-ils en accord : 0,46 ms ; 2,2 ms ; 22 ms ?

c. Pendant combien de τ faut-il maintenir le commutateur dans la position convenable pour que la décharge du condensateur puisse être considérée comme totale ?

Charge et décharge d'un condensateur

Contexte

L'objectif est de déterminer la capacité d'un condensateur par la mesure d'un temps caractéristique en visualisant, à l'aide d'un oscilloscope, la tension aux bornes d'un condensateur lors de sa charge et de sa décharge.

Documents mis à disposition

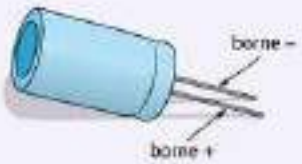
Les condensateurs sont des dipôles qui peuvent stocker de l'énergie sous forme de charges électriques. Ils ont de nombreuses utilisations, tels que les filtres dans les alimentations et les circuits électroniques, ou pour constituer des réservoirs d'énergie. Un condensateur est caractérisé par la valeur de sa capacité C exprimée en farad (F).

Un circuit RC série est le moyen le plus simple de mettre en évidence la charge et la décharge du condensateur. Ces régimes transitoires sont quantifiés à l'aide d'une grandeur appelée temps caractéristique qui est égale à la durée requise pour que la tension aux bornes du condensateur atteigne 63% de la valeur de la tension délivrée par le générateur lors de la charge. La valeur du temps caractéristique est aussi égale au produit $R \times C$.

Notice d'utilisation des appareils électrique : GBF, oscilloscope, multimètre.

Matériel mis à disposition

- un générateur basse fréquence (GBF) réglé pour délivré un signal carré de fréquence 20 Hz
- un oscilloscope
- un multimètre
- un conducteur ohmique de résistance $R = 10\ k\Omega$
- un condensateur à étudier
- des fils de connexion



Travail à effectuer

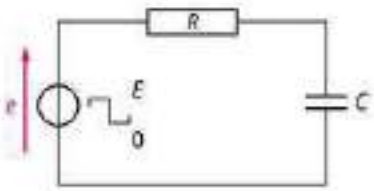
1. (AFP) **Réglages du GBF et de l'oscilloscope** *(15 min conseillées)*

- Relier le GBF à l'oscilloscope et réaliser les réglages nécessaires afin :
  - que le signal carré délivré par le GBF ait une amplitude de 5,0 V ;
  - qu'au moins deux périodes du signal soient visualisables sur l'écran de l'oscilloscope.

Être en mesure de présenter les réglages effectués

2. (ANAL) (RÉA) **Charge et décharge du circuit RC** *(20 min conseillées)*

1. Réaliser le circuit schématisé ci-contre en respectant la polarité du condensateur.
2. Indiquer sur le schéma les branchements qui permettront de visualiser à l'oscilloscope les tensions aux bornes du générateur (voie A) et du condensateur (voie B).
3. Réaliser les branchements après validation par le professeur.



Être en mesure de présenter le montage expérimental

3. (RÉA) (VAL) **Mesure du temps caractéristique** *(30 min conseillées)*

1. Mesurer la valeur du temps caractéristique du circuit RC en optimisant les réglages de l'oscilloscope.
2. En déduire la valeur expérimentale de la capacité du condensateur étudié.

Cette valeur est-elle en accord avec l'indication fournie par le constructeur ?

3. Défaire le montage et ranger la paillasse

PISTE POUR LE GRAND ORAL PRÉPA BAC

Pour se préparer à l'Oral
➥ Livret LES CLÉS DU BAC (en début de manuel)

UNE QUESTION

Les condensateurs peuvent-ils remplacer les batteries ?

Enjeu de la question

Les appareils électriques nomades nécessitent de disposer d'une source d'énergie assurant le fonctionnement attendu par l'utilisateur. À ce titre, les condensateurs sont souvent présentés comme les batteries du futur.

Proposition de plan de présentation

1. Rappeler le principe de fonctionnement d'une batterie électrochimique.
2. Rappeler le principe de fonctionnement d'un condensateur.
3. Comparer les avantages et inconvénients des caractéristiques principales des deux dispositifs.
4. Conclusion : intérêt des condensateurs et perspectives.

Les mots-clés

rapidité de charge/décharge ▸ capacité de stockage ▸ énergie ▸ durée de vie ▸ rendement

Exemple de support de présentation

	 Condensateur	 Batterie
VITESSE	• Charge lente • Décharge limitée	• Charge/Décharge rapide
CAPACITÉ	• Faible capacité de stockage	• Capacité de stockage limitée
DURÉE DE VIE	• Nombre de cycles de charge limité • Usure des constituants	• Nombre de cycles presque illimité • Pas d'usure du composant
RENDEMENT	• Rendement limité	• Rendement très élevé

Batterie* vs *Condensateur

QUESTIONS D'APPROFONDISSEMENT POSSIBLES



UN EXEMPLE DE PROJET PROFESSIONNEL

Les métiers associés au stockage de l'énergie et plus généralement aux économies d'énergie connaissent un développement important. La recherche de solutions technologiques permettant une optimisation du stockage et des rendements nécessite des développements nombreux qui s'appuient sur l'innovation et l'expérience.

Après le bac : *Bac + 2 DUT ou BTS puis licence professionnelle dans le génie électrique*
Autres métiers : *Technicien de maintenance industrielle, ingénieur en génie électrique, électronicien*

Un **électrotechnicien** est une personne qui conçoit et développe de nouveaux systèmes électriques et teste des équipements technologiques et industriels. Ils étudient et appliquent la physique et les mathématiques de l'électricité, de l'électromagnétisme et de l'électronique à des systèmes à grande et à petite échelle pour, par exemple, traiter l'information ou stocker de l'énergie.



EXERCICES DE SYNTHÈSE — PRÉPA BAC

Exercice résolu — EN AUTONOMIE

20 min

1 Diffraction par un tamis

Un faisceau laser monochromatique, de longueur d'onde $\lambda = 532$ nm et se propageant dans l'air, est dirigé vers un tamis de laboratoire (sorte de grille) à mailles carrées de côté a.

On observe sur un écran une figure de diffraction identique à celle représentée ci-contre. La tache centrale est un carré de côté $L = 2{,}66$ cm.

Le laser est placé à une distance $d = 40$ cm du tamis ; la distance entre le tamis et l'écran vaut $D = 2{,}0$ m.

Un tamis à mailles carrées possède des propriétés diffractantes identiques à celles observées lors de la superposition de deux fentes allongées de même largeur et disposées perpendiculairement l'une par rapport à l'autre.



FIG 1 Figure de diffraction

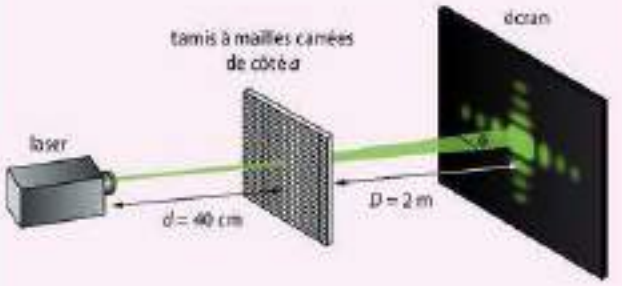


FIG 2 Dessin de l'expérience

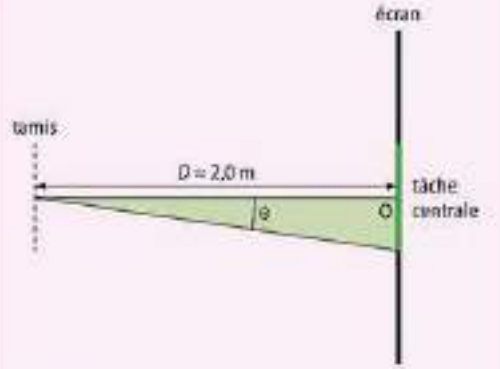


FIG 3 Schéma de l'expérience

1. a. Quel caractère de la lumière l'apparition d'une figure de diffraction met-elle en évidence ?
b. Dans quelle condition ce phénomène est-il observable ?

2. a. Rappeler la relation qui lie la longueur d'onde dans le vide λ, la célérité de la lumière c dans le vide et la période T. Exprimer puis calculer la valeur de la fréquence ν correspondante.
b. Calculer l'énergie associée à un photon laser de fréquence ν.

DONNÉES
- Constante de planck : $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ J · s
- Célérité de la lumière dans le vide : $c = 3 \times 10^8$ m · s^{-1}

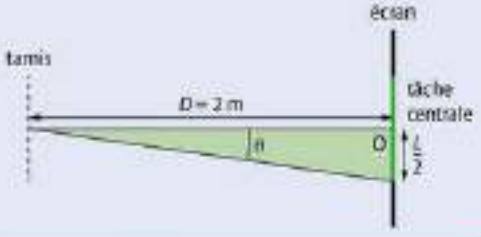
3. a. Montrer, en s'aidant du schéma, que l'écart angulaire θ noté sur le schéma peut s'écrire $\theta = L / 2D$.
On se placera dans l'approximation des petits angles : $\tan\theta = \theta$ (rad).
b. Rappeler la relation qui lie l'écart angulaire θ à la longueur d'onde λ et au côté a de la maille.
c. Exprimer puis calculer la dimension a d'une maille du tamis.

EXEMPLE DE RÉDACTION

1. a. L'apparition d'une figure de diffraction met en évidence le caractère ondulatoire de la lumière.
b. Ce phénomène est observable quand la taille de l'ouverture est petite devant la longueur d'onde.

2. a. $c = \lambda/T = \lambda \cdot \nu$
b. $E = h \cdot \nu = h \cdot c/\lambda = 6{,}63 \cdot 10^{-34} \times 3 \times 10^8 / 532 \times 10^{-9} = 4 \times 10^{-19}$ J

3. a. $\tan\theta = (L/2) / D = L/(2 \cdot D)$
$\tan\theta = \theta$ donc $\theta = L/(2 \cdot D)$
b. $\theta = \lambda/a$
c. $\lambda/a = L/(2 \cdot D)$
Donc $a = 2 \cdot D \cdot \lambda/L$
$a = (2 \times 2{,}0 \times 532 \times 10^{-9})/(2{,}66 \times 10^{-2}) = 8{,}0 \times 10^{-5}$ m $= 80$ µm



Exercice guidé EN AUTONOMIE

THÈME 4

30 min

2 Étude d'un dipôle RC

On charge un condensateur de capacité C inconnue à travers un conducteur ohmique de résistance $R = 330\ k\Omega$ à l'aide d'un générateur délivrant une tension continue constante égale à $u_0 = 12{,}0\ V$ (figure 1).

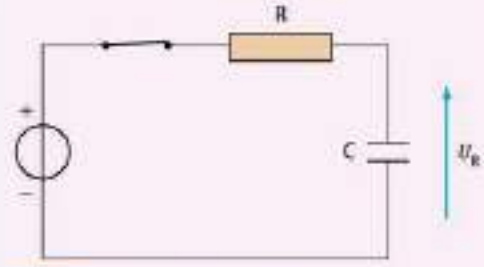


FIG 1 Schéma du montage

On relève les valeurs de la tension u_c aux bornes du condensateur pour différentes dates données. On obtient un tableau de mesures (figure 2).

Ce tableau de mesures correspond à la courbe représentées sur la figure ci-contre (figure 3).

t (s)	0	5	10	15	20	30	40
u_c (V)	0,0	1,6	3,0	4,2	5,2	6,9	8,2
t (s)	50	70	100	150	200	220	250
u_c (V)	9,1	10,4	11,3	11,8	11,9	12,0	12,0

FIG 2 Tableau de mesures

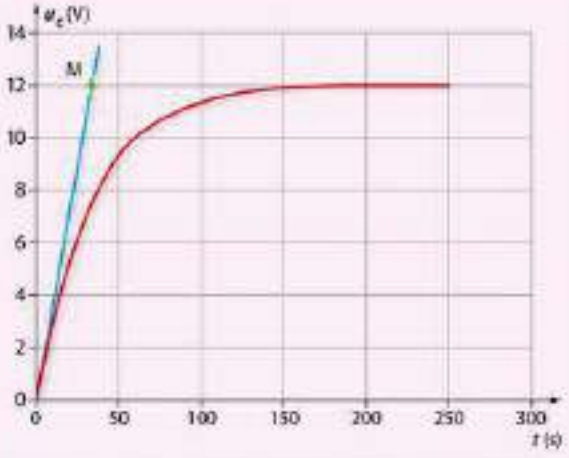


FIG 3 Courbe associée au tableau de mesures

L'objectif de cet exercice est de déterminer la capacité C du condensateur en calculant la constante de temps τ du dipôle RC.

1. Quelle est la valeur de la tension u_c lorsque l'intensité du courant s'annule ?

Coups de pouce

Lorsque l'intensité du courant dans le circuit s'annule, la tension aux bornes du conducteur ohmique est nulle.

2. a. Donner l'expression de la constante de temps τ d'un dipôle RC.

b. Montrer que la dimension de cette grandeur τ est bien celle d'un temps.

3. a. Vérifier que l'équation différentielle à laquelle satisfait la tension u_c peut s'écrire :

$$R \cdot C \cdot \left(\frac{du_c}{dt}\right) + u_c = u_0$$

En appliquant la loi d'additivité des tensions, on peut écrire que : $u_0 = R \cdot i + u_c$

b. Une méthode de détermination de τ fait appel au tracé de la tangente à la courbe $u_c = f(t)$ (figure 2) à l'instant $t = 0$. Montrer que cette tangente coupe la droite $u_c = u_0$ en un point M d'abscisse $t = \tau$.

c. En déduire la valeur numérique de cette constante de temps τ.

- À $t = 0$, $u_c = 0$
- la valeur de $\left(\frac{du_c}{dt}\right)$ à $t = 0$ est le coefficient directeur de la tangente à l'origine de la courbe $u_c = f(t)$.

4. Calculer la capacité du condensateur.

5. La valeur indiquée par le constructeur est $C = 100\ \mu F$ à 20 % près.
L'incertitude sur la valeur de la résistance R est supposée négligeable. La valeur obtenue à la question **4.** est-elle est accord avec la tolérance de fabrication ? Justifier.

La valeur est en accord avec la tolérance de fabrication si elle est comprise dans l'intervalle possible de valeur donnée par le constructeur.

EXERCICES DE SYNTHÈSE PREPA BAC

50 min

3 Connexion WiFi pour piloter un drone

Les drones de loisirs à quatre hélices sont des véhicules aériens de faibles dimensions. Ils sont vendus au grand public comme un jeu pour l'intérieur ou l'extérieur.

De nombreux drones sont pilotés depuis un téléphone portable à l'aide d'une connexion Wifi (fig. 1).

Un réseau Wifi permet une communication par ondes électromagnétiques entre différents appareils. Les connexions Wifi peuvent se faire suivant plusieurs protocoles de communication dont le protocole standard IEEE 802.11 g dont les principales caractéristiques sont résumées dans le tableau de la figure 2.



FIG 1 Un drone piloté par un téléphone portable

Standard	IEEE 802.11 g
Débit théorique maximal	54 Mbits/s
Fréquence des ondes électromagnétiques	2,4 GHz
Puissance d'émission maximale autorisée en France	100 mW
Distance de fonctionnement	Intérieur 20 m ; extérieur 50 m
Modélisation de l'atténuation du signal à 2,4 GHz en fonction de la distance	$A = 40 + 20 \times \log(d)$ A : atténuation en décibel (dB) D : distance en mètres entre l'émetteur et le récepteur

FIG 2 Principales caractéristiques du protocole standard IEE 802.11 G

Les phénomènes de réflexion et de diffraction sont utiles pour capter le signal à un endroit où l'émetteur n'est pas visible : on dit qu'on est en condition de Non Line Of Sight (NLOS), c'est-à-dire que l'on n'a pas une ligne de vision directe. Mais les réflexions et diffractions peuvent également être nuisibles lorsqu'elles font apparaître de multiples chemins possibles entre l'émetteur et le récepteur (fig. 3).

Exemple de chemins multiples

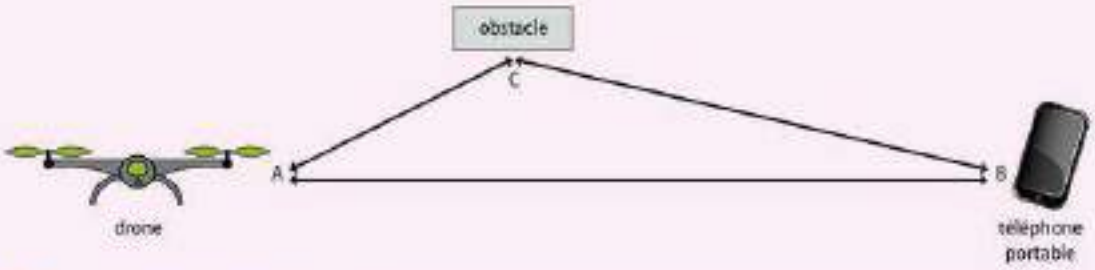


FIG 3 Exemple de chemins multiples

Les signaux transmis en WiFi se dégradent avec la distance et avec les obstacles, ce qui limite la portée et le débit de la liaison.

L'objectif de cet exercice est de mettre en évidence quelques phénomènes physiques qui influencent la qualité de la transmission des informations en Wifi.

DONNÉES

▸ Vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide et dans l'air :

$$c = 3{,}0 \times 10^{8}\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

▸ Atténuation d'un signal

L'atténuation A d'un canal de transmission est définie par : $A = 10 \times \log(Pe/Pr)$

A : atténuation en décibel (dB)

Pe : puissance d'émission en watt (W)

Pr : puissance reçue en watt (W)

▸ Effet Doppler

Lorsque l'émetteur d'une onde se déplace par rapport au récepteur, le décalage Doppler est donné par la relation $f_R - f_E = \pm (v/c) \cdot f_E$ dans le cas où la vitesse de déplacement est faible par rapport à la vitesse de propagation des ondes. Le signe est fonction du sens de déplacement de l'émetteur par rapport au récepteur.

f_R est la fréquence reçue par le récepteur ; f_E est la fréquence émise par l'émetteur ; c est la vitesse de propagation des ondes ; v est la vitesse de déplacement de l'émetteur.



FIG 4 Schématisation de la situation d'étude

1. Transmission d'informations avec le protocole standard IEEE 802.11 g

Un drone est piloté à l'aide d'un téléphone portable (fig. 4). Il est équipé d'une webcam de résolution 1 280 × 720 pixels filmant à 30 images par seconde. Le codage de chaque image est de 24 bits par pixel. Il envoie ses informations au téléphone portable *via* le réseau Wifi. Lorsque le drone s'éloigne du téléphone, le signal électromagnétique reçu par celui-ci s'affaiblit.

1. Calculer l'atténuation du signal lorsque le drone se situe à 10 m du téléphone portable.

2. En déduire la puissance maximale que peut recevoir le téléphone lorsqu'il est situé à 10 m du drone.

3. Le débit théorique maximal de la connexion Wifi permet-il de visualiser la vidéo en direct sur le téléphone portable ?

2. Les problèmes de transmission en Wifi

On aborde les problèmes de transmission entre le drone et le téléphone portable lorsque le drone se déplace à une vitesse de croisière de l'ordre de $3{,}0\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

1. Comparer la fréquence de l'onde radio émise par le drone à la fréquence de l'onde reçue par le téléphone portable lorsque le drone s'éloigne. Estimer la variation relative de la fréquence.

2. Calculer la longueur d'onde des signaux émis en Wifi.

3. Un tronc d'arbre placé sur le trajet des ondes Wifi est-il susceptible de diffracter ces ondes ? Justifier.

4. La superposition d'ondes ayant parcouru des chemins différents peut provoquer des interférences. À quelle condition obtient-on des interférences destructives ? Dans ce cas, quelle sera la conséquence sur la valeur de la puissance reçue ?

5. τ_1 et τ_2 représentent respectivement la durée du trajet de l'onde A-C-B et celle du trajet A de l'onde B entre le drone et le téléphone. On définit la durée $\Delta t = \tau_1 - \tau_2$. Parmi les 5 valeurs de Δt suivantes, indiquer celle(s) qui conduit (conduisent) à des interférences destructives. Justifier votre réponse.

T/2, T, k · T, k · T + T/2, k · T/2 k est un entier naturel

50 min

4 Maquettes d'instruments optiques à deux lentilles convergentes

Lors d'une séance de travaux pratique, un élève cherche à réaliser, sur banc optique, la maquette d'un instrument d'optique à l'aide deux lentilles convergentes.



1. Une première maquette

La première maquette est réalisée sur banc optique et est modélisée sur la figure 1.

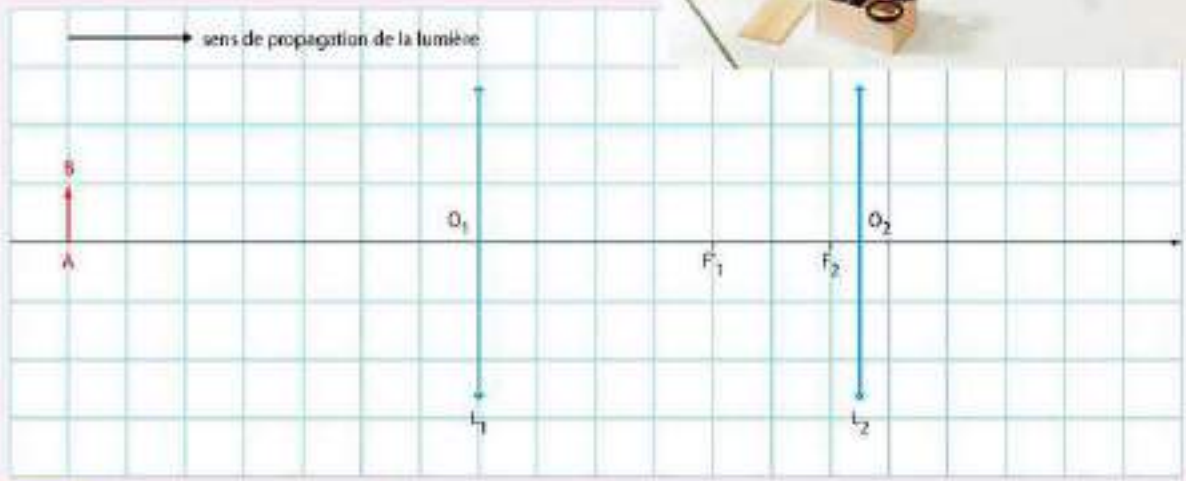


FIG 2 Schématisation de la première maquette

L'élève mesure :

$\overline{AO_1} = 140$ cm, $\overline{O_1F_1} = 80$ cm, $\overline{O_2F_2} = -10$ cm, $\overline{O_1O_2} = 130$ cm, $\overline{AB} = 20$ cm.

1. Reproduire la figure 1 et construire l'image A_1B_1 de l'objet AB à travers L_1, puis $A_1'B_1'$ de l'objet A_1B_1 à travers L_2.

2. a. Déterminer par un calcul adapté : $\overline{O_1A_1}$ et $\overline{O_2A'}$

b. Comparer ces valeurs à celles qui peuvent être déduite de la construction effectuée sur la figure 1.

3. Caractériser l'image de l'objet obtenue à l'aide de cet instrument optique.

4. Le grandissement d'un instrument d'optique se détermine en faisant le rapport de la taille de l'image sur celle de l'objet. Peut-on parler de grandissement dans le cas de la maquette réalisée ? Si oui en déterminer sa valeur.

DONNÉES

- Relation de conjugaison d'une lentille convergente de distance focale f' placée en O pour un objet placé en A et une image formée en A' :

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'}$$

2. La maquette d'une lunette astronomique

L'élève cherche à réaliser la maquette d'une lunette astronomique.

1. Quel est le principe d'une lunette astronomique ?

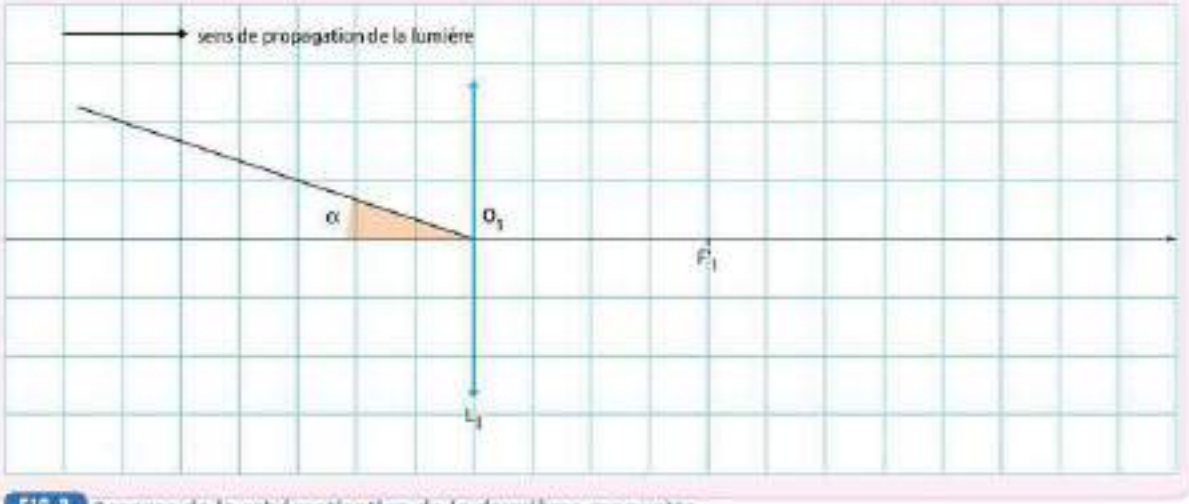


FIG 2 Amorce de la schématisation de la deuxième maquette

2. Reproduire la figure 2 et y placer la lentille 2 pour réaliser la maquette d'une lunette astronomique :

b. Qu'appelle-t-on :
- objectif ?
- oculaire ?
- cercle oculaire ?

3. On suppose que la maquette ainsi réalisée est la reproduction sur banc optique d'une véritable lunette astronomique. On utilise cette maquette pour observer un point lumineux, comme un astre lointain, qui émet en direction de la lunette.

On appelle α l'angle formé par le rayon provenant de l'infini et l'axe optique de l'instrument optique.

On appelle α' l'angle formé par le rayon émergeant (issu du rayon précédent) et l'axe optique de l'instrument optique.

Dans une lunette astronomique, α et α' sont petits. On peut donc faire les approximations : $\tan \alpha = \alpha$ et $\tan \alpha' = \alpha'$

a. Construire sur la figure 2 la marche du rayon lumineux provenant de l'infini.

b. Où se trouve l'image de l'astre observée à travers la lunette ? La situer par rapport à L_2 et donner ses caractéristiques.

c. Déterminer le grossissement de la lunette.

d. Pourquoi ne parle-t-on pas de grandissement dans le cas d'une lunette astronomique ?

4. L'observateur n'a pas de défaut de vision. Où doit-il placer son œil pour observer l'image de l'astre ? Doit-il accommoder ?



EXERCICES DE SYNTHÈSE

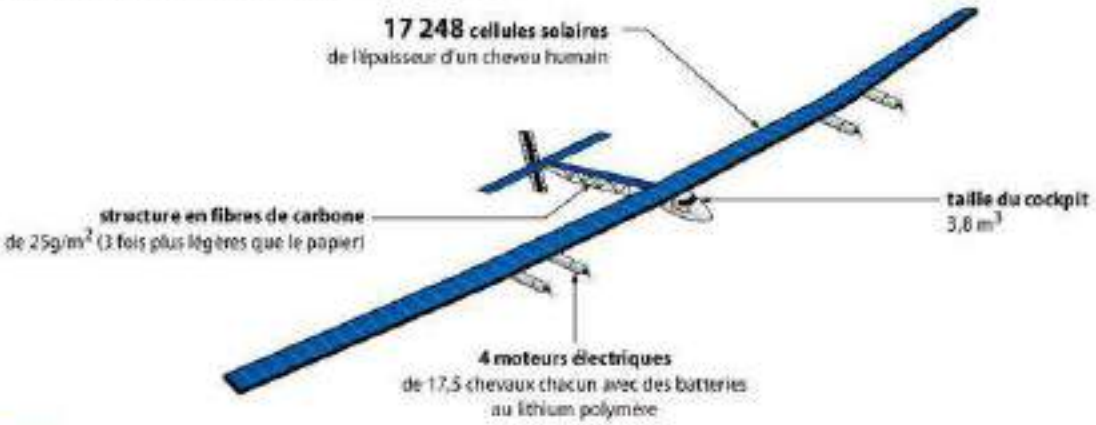
PREPA BAC

50 min

5 L'avion solaire « Solar Impulse » : un challenge énergétique à relever



L'avion solaire *Solar Impulse* est le résultat d'un projet ayant comme objectif de faire voler, lors d'un tour du monde, un avion à moteurs électriques uniquement alimentés par l'énergie solaire.

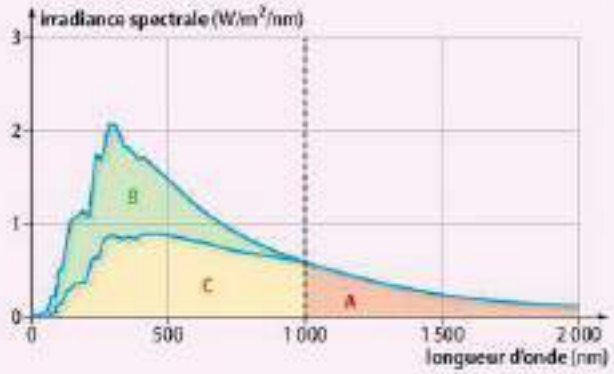


DOC 1 Caractéristiques de trois types de cellules photovoltaïques existantes

Type de matériaux de la cellule	Durabilité	Rendement typique en %	Rendement maximum en %	Coût de fabrication
Silicium mono cristallin	Supérieure à 20 ans	De 15 à 20	25	+++
Silicium poly cristallin	Supérieure à 20 ans	De 12 à 16	20	++
Silicium amorphe	20 ans	De 5 à 8	13	+

DOC 2 Les photons utiles de l'effet photoélectrique pour le silicium

Les photons ayant une énergie inférieure à E_g ne peuvent pas être utilisés par le silicium pour produire de l'énergie électrique est donc convertie en énergie thermique. L'énergie perdue par ces photons non-absorbés représente 23,5 % de l'énergie solaire. Les photons ayant une énergie supérieure à E_g peuvent eux déloger un électron utile, mais l'énergie excédentaire sera perdue elle aussi. Cet excès d'énergie représente quant à lui 33 % de l'énergie solaire. C'est ce que montre le schéma ci-contre. À ces pertes, s'ajoutent celles du facteur de forme, de la réflexion et de la surface des collecteurs



DONNÉES

- $c = 3{,}0 \times 10^8\ m \cdot s^{-1}$. $h = 6{,}62 \times 10^{-34}\ m^2 \cdot kg \cdot s^{-1}$.
  $1\ eV = 1{,}6 \times 10^{-19}\ J$ $1\ nm = 1 \times 10^{-9}\ m$
  $1\ ch = 735{,}5\ W$
- Effet photoélectrique. Les théories actuelles associent à chaque onde électromagnétique du rayonnement solaire une particule appelée photon dont l'énergie est donnée par la relation de Planck :

$$E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda$$

avec E : énergie du photon (en J) ;
ν : fréquence de l'onde électromagnétique (en Hz) ;
c : célérité de la lumière dans le vide (en $m \cdot s^{-1}$) ;
λ : longueur d'onde de l'onde électromagnétique (en m)

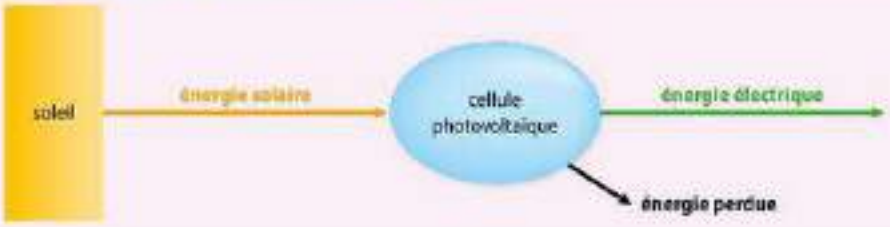
1. Étude du vol de jour

Le jour, l'avion est soumis à une puissance solaire surfacique moyenne de 1 000 W · m^{-2}.

1. Calculer, en kW, la puissance solaire reçue par les 269,5 m^2 de cellules solaires de l'avion.

2. Le diagramme des puissances d'une cellule solaire est présenté par le **document 3**.

DOC 3 Diagramme des puissances d'une cellule solaire



En tenant compte du rendement de 23 % qui est celui des cellules solaires, montrer que la puissance électrique que peuvent fournir les cellules solaires de l'avion est de 62,0 kW.

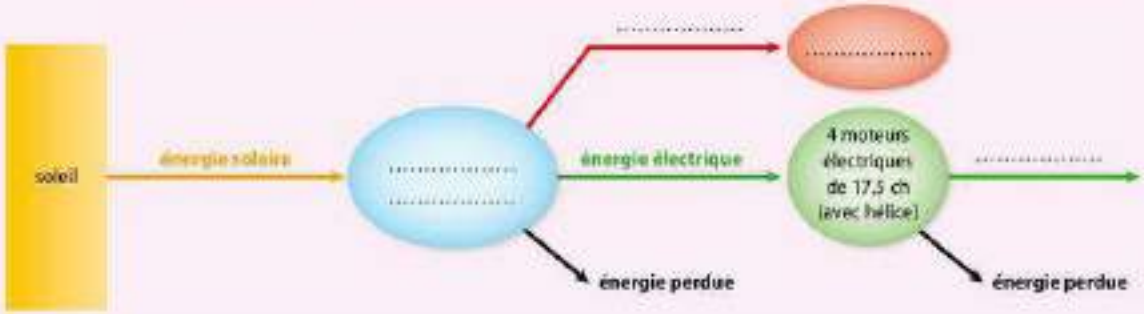
3. En justifiant la réponse, indiquer si cette puissance est suffisante pour alimenter les quatre moteurs fonctionnant à pleine puissance et ayant un rendement de 94 %.

4. L'énergie collectée par les cellules solaires est en partie stockée dans des batteries au lithium polymère, de masse totale de 633 kg et d'une densité énergétique de 260 W · h · kg^{-1}.

En admettant que 25 % de la puissance électrique produite par les cellules solaires est en moyenne utilisée pour la recharge des batteries, calculer la durée d'exposition solaire nécessaire pour recharger intégralement les batteries de l'avion.

5. Recopier et compléter le diagramme en énergie de l'avion solaire volant de jour du **document 4**.

DOC 4 Diagramme des énergies de l'avion solaire



2. Cellule photovoltaïque et effet photoélectrique

1. Expliquer pourquoi les concepteurs de l'avion *Solar Impulse* ont retenu les cellules en silicium monocristallin.

2. Le rendement de 23 % des cellules photovoltaïques de *Solar Impulse* est l'un des meilleurs rencontrés pour ce type de convertisseur d'énergie à l'heure actuelle. Ce rendement peut-il être qualifié de bon rendement d'énergie ? Justifier la réponse.

3. Seuls les photons dont l'énergie est supérieure à $E_g = 1,12$ eV (appelée gap du silicium) peuvent libérer un électron qui participera au courant électrique délivré par la cellule photovoltaïque en silicium. Déterminer en nm la longueur d'onde de l'onde électromagnétique dont le photon a une énergie égale au gap du silicium.

4. Indiquer à quelle(s) zone(s) (A, B ou C) du **document 2** correspondent les photons potentiellement utiles à la production d'énergie électrique par le silicium ?

50 min

6 Mesure de la capacité d'un condensateur

On se propose de mesurer par deux méthodes, la capacité C d'un condensateur.

1. Première méthode

Le condensateur est relié à un générateur de courant délivrant un courant d'intensité I constante et réglable. Un voltmètre de résistance infinie permet de mesurer la tension u_{AB} aux bornes du condensateur (figure 1).

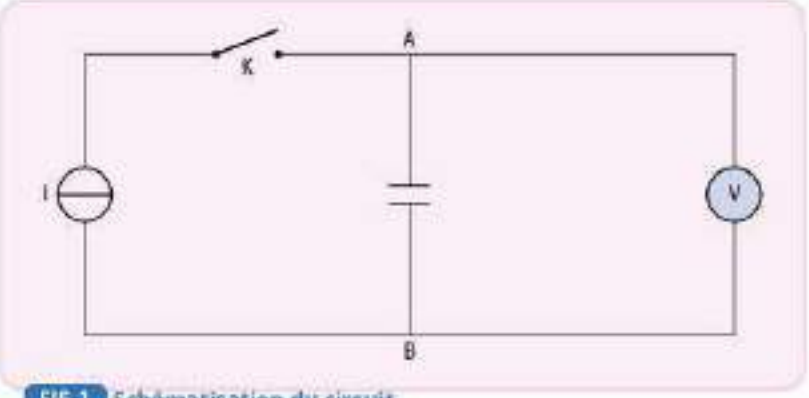


FIG 1 Schématisation du circuit

Le condensateur étant initialement déchargé, on ferme l'interrupteur K à l'instant $t_0 = 0$ et l'on observe qu'à l'instant t_1 la tension u_{AB} atteint une certaine valeur u_1.

1. Montrer que la tension aux bornes du condensateur à l'instant t a pour expression : $u_{AB} = I \cdot t / C$

2. Pour $I = 10\ \mu A$, u_A atteint la valeur $u_1 = 6{,}0$ V à l'instant $t_1 = 7{,}2$ s. Calculer la valeur de la capacité C du condensateur.

2. Deuxième méthode

On réalise à présent le montage ci-contre (figure 2) :

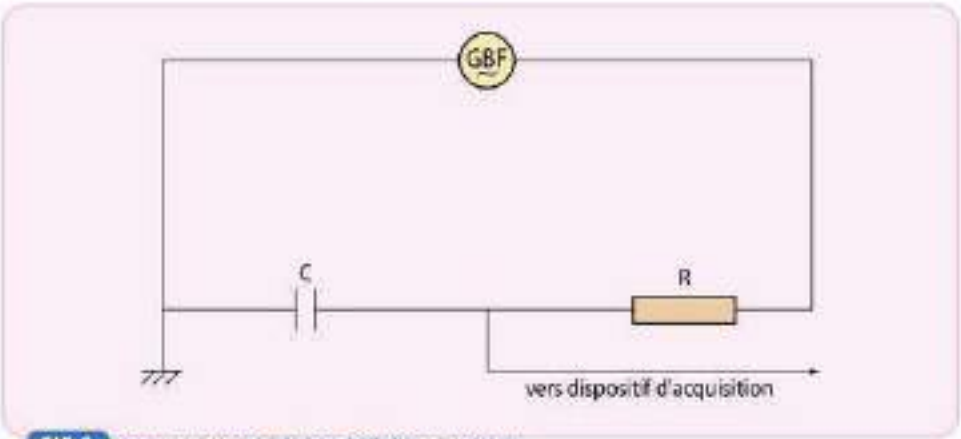
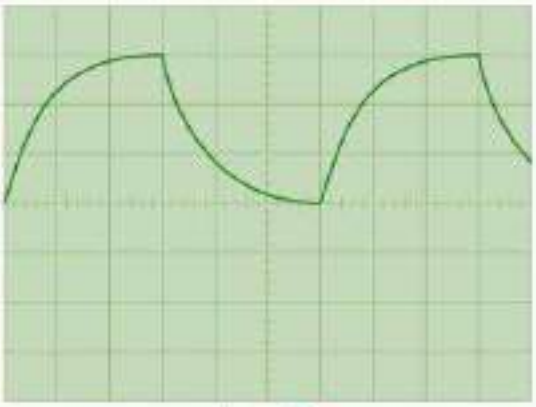
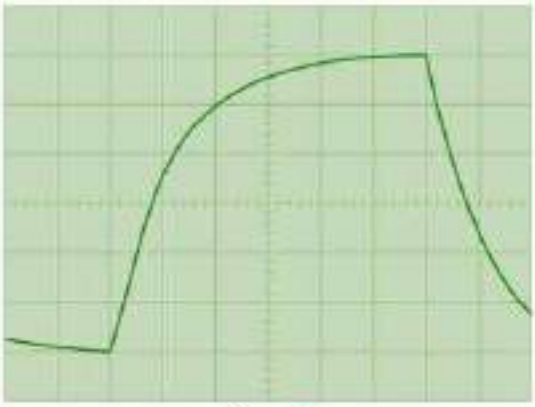


FIG 2 Montage avec dispositif d'acquisition

Le GBF délivre une tension en créneau, variant de 0 à $u_m = 6$ V.
Selon des réglages du logiciel d'acquisition, on obtient les écrans ❶ et ❷ ci-dessous :



Écran ❶
Réglages :
balayage horizontale : 20 ms · div^{-1} ;
sensibilité verticale : 2 V · div^{-1}.



Écran ❷
Réglages :
balayage horizontale : 10 ms · div^{-1} ;
sensibilité verticale : 1 V · div^{-1}.

On appelle temps caractéristique τ la durée au bout de laquelle le condensateur, initialement déchargé, atteint 63 % de sa charge maximale.

Donnée : $R = 1\,000\ \Omega$

1. a. Que visualise-t-on sur les écrans ❶ et ❷. Comment expliquer l'allure du signal observé ?
b. Reproduire l'écran ❶ et ajouter l'allure du signal délivré par le GBF.
c. Quel est la fréquence du signal délivré par le GBF ?

2. Donner l'expression du temps caractéristique τ du dipôle RC.

3. Vérifier que l'équation différentielle à laquelle satisfait la tension u_c peut s'écrire :

$$RC(\mathrm{d}u_c/\mathrm{d}t) + u_c = u_m$$

4. La solution de l'équation différentielle établie à la question précédente est de la forme :

$$u = u_m \cdot (1 - \mathrm{e}(-t/RC))$$

Quelle valeur prend la tension u à la date $t = \tau$?

5. Une méthode de détermination de τ fait appel au tracé de la tangente à la courbe $u_c = f(t)$ à l'instant $t = 0$. Montrer que cette tangente coupe la droite $u_c = u_m$ en un point d'abscisse $t = \tau$.

6. En plus de la durée du balayage horizontal et de la sensibilité verticale, quels réglages a-t-on modifiés sur l'oscilloscope pour passer de l'écran ❶ à l'écran ❷ ? Pour quelle raison ?

7. Mesurer τ en utilisant l'écran le mieux approprié. Indiquer la méthode employée en reproduisant l'écran sur lequel s'appuie la mesure.

8. a. Déduire de cette mesure la valeur de la capacité C du condensateur.
b. La valeur indiquée par la constructeur est $C = 12\ \mu$F à 5 % près. La valeur obtenue à la question précédente est-elle en accord avec la tolérance de fabrication ? Justifier.

FICHE MÉTHODE 1 MATHS

Utiliser le logarithme décimal et sa réciproque

1 Définition

Soit a un nombre réel strictement positif ($a > 0$).

Le logarithme décimal de a, noté $\log a$, est l'unique réel x tel que $a = 10^x$.

Réciproquement, $\log a$ est l'exposant de la puissance de 10 qui donne a.

$a = 10^x$ équivaut à $x = \log a$

2 Propriétés

a et b sont des réels strictement positifs.

$\log 1 = 0$	$\log \frac{1}{a} = -\log a$
$\log 10 = 1$	$\log (a \times b) = \log a + \log b$
$\log (10^a) = a$	$\log \frac{a}{b} = \log a - \log b$

3 Utilisation en chimie

Le pH d'une solution aqueuse, grandeur sans unité, vaut : $\text{pH} = -\log\left(\frac{[H_3O^+ (aq)]}{c^\circ}\right)$ où $c^\circ = 1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

et $[H_3O^+ (aq)]$ est la concentration en quantité de matière d'ions oxonium $H_3O^+ (aq)$ (en $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$).

On a donc : $[H_3O^+ (aq)] = c^\circ \times 10^{-\text{pH}}$

EXEMPLE

Si $[H_3O^+ (aq)] = 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ alors $\text{pH} = 2$;

pour $\text{pH} = 8{,}5$, on a $[H_3O^+ (aq)] = 10^{-8{,}5} = 3{,}2 \times 10^{-9} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

4 Utilisation en physique

Le niveau d'intensité sonore L, exprimé en dB, est défini par : $L = 10 \log \frac{I}{I_0}$

où I est l'intensité sonore (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) et $I_0 = 1{,}0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ le seuil d'audibilité.

On a donc : $I = I_0 \times 10^{\frac{L}{10}}$.

EXEMPLE

Si l'intensité sonore $I = 5{,}9 \times 10^{-7} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ alors le niveau d'intensité sonore associé est $L = 10 \log \frac{5{,}9 \times 10^{-7}}{1{,}0 \times 10^{-12}} = 58 \text{ dB}$;

pour un niveau d'intensité sonore $L = 80$ dB, on a une intensité sonore $I = 1{,}0 \times 10^{-12} \times 10^{\frac{80}{10}} = 1{,}0 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

FICHE MÉTHODE 2 MATHS

Résoudre une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants

1 Définition

On appelle équation différentielle linéaire du 1er ordre à coefficients constants sans second membre, toute équation pouvant s'écrire sous la forme :

$$u' + ku = 0 \text{ ou } \frac{du}{dt} + ku = 0 \text{ où } k \text{ est une constante.}$$

Cette équation fait intervenir une fonction du temps $u(t)$ et sa dérivée $u'(t)$.

Une équation différentielle de ce type admet pour solution la fonction :

$$u(t) = u_0\, e^{-kt}$$

où k est une constante déterminée par la condition initiale donnée par l'énoncé ($u(0) = u_0$).

Note
La notation u' est utilisée en cours de mathématiques. La notation $\frac{du}{dt}$ est utilisée en sciences physiques (FICHE MÉTHODE 4 ➥ p. 535).

EXEMPLES

- Le nombre de noyaux radioactifs présents dans un échantillon à la date t vérifie l'équation différentielle $\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t)$ soit $\frac{dN}{dt} + \lambda N(t) = 0$. Celle-ci admet pour solution $N(t) = u_0\, e^{-\lambda t}$. À $t = 0$ s, on a $N(0) = N_0$, alors $u_0 = N_0$ et $N(t) = N_0\, e^{-\lambda t}$.
- L'équation différentielle vérifiée par la tension $u_c(t)$ aux bornes d'un condensateur dans le cas de sa décharge, qui s'écrit : $\frac{du_c(t)}{dt} + \frac{1}{RC} u_c(t) = 0$, admet pour solution $u_c(t) = E e^{-\frac{t}{RC}}$.

2 Équation avec un second membre constant

L'équation différentielle précédente comporte un second membre constant si elle s'écrit sous la forme :

$$u' + ku = K \text{ ou } \frac{du}{dt} + ku = K \text{ où } k \text{ et } K \text{ sont des constantes.}$$

Une équation différentielle de ce type admet pour solution la fonction :

$$u(t) = u_0\, e^{-kt} + u_{lim} \text{ où } u_0 \text{ et } u_{lim} \text{ sont des constantes.}$$

La constante u_0 est déterminée par la condition initiale donnée par l'énoncé ($u(0) = u_0$); la constante u_{lim} est la valeur de $u(t)$ quand t tend vers l'infini.

EXEMPLES

- La loi thermique de Newton est une équation différentielle qui s'écrit $\frac{dT(t)}{dt} = -\gamma(T - T_{th})$ et dont la solution est : $T(t) = u_0\, e^{-\gamma t} + u_{lim}$.
- Quand t tend vers l'infini : $T = T_{th} = u_{lim}$, et à $t = 0$ s : $T_0 = u_0 + T_{th}$, donc $u_0 = T_0 - T_{th}$ soit $T(t) = (T_0 - T_{th})e^{-\gamma t} + T_{th}$.

L'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes d'un condensateur dans le cas de sa charge par une source idéale de tension s'écrit : $\frac{du_c(t)}{dt} + \frac{1}{RC} u_c(t) = \frac{E}{RC}$. Elle admet pour solution $u_c(t) = E - E e^{-\frac{t}{RC}} = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$.

Résoudre une équation du second degré

1 Définition

Une équation du second degré est une équation qui peut s'écrire :

$$ax^2 + bx + c = 0 \text{ où } a, b \text{ et } c \text{ sont des réels, } a \text{ étant non nul.}$$

Son discriminant Δ est le nombre $\Delta = b^2 - 4ac$.

2 Solutions

EXEMPLE

Si $\Delta > 0$

l'équation admet alors deux solutions distinctes :

$$x_1 = \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2a} \text{ et } x_2 = \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2a}$$

Attention ! Il arrive parfois en physique-chimie qu'une seule des 2 solutions ne soit possible.

EXEMPLE

Si $\Delta = 0$

l'équation a une unique solution :

$$x_0 = -\frac{b}{2a}$$

EXEMPLE

Si $\Delta < 0$

l'équation n'a pas de solution.

3 Utilisation en chimie

Lors de l'étude d'un couple acide-base, à partir de la constante d'acidité du couple qui s'écrit $K_A = \frac{(c \cdot \tau)^2}{c \cdot (1 - \tau)}$ on peut obtenir l'équation du second degré suivante :

$$c \cdot \tau^2 + K_A \cdot \tau - K_A = 0$$

Son discriminant vaut $\Delta = K_A^2 + 4\, K_A \cdot c$.

La solution $\tau = \frac{-K_A + \sqrt{\Delta}}{2 \cdot c}$ étant négative, il n'existe qu'une seule solution donnant le taux d'avancement final : $\tau = \frac{-K_A + \sqrt{\Delta}}{2 \cdot c}$.

Dériver une fonction

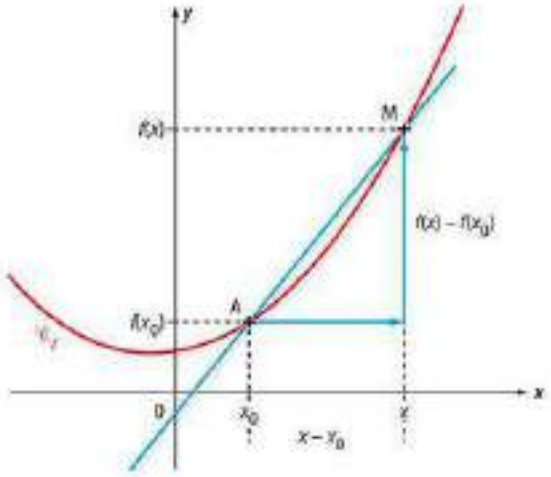
En mécanique, en cinétique chimique et plus généralement dans les équations différentielles, la notion de dérivation de fonction est omniprésente.

1 Écriture conventionnelle d'une dérivée

• Exprimer la fonction dérivée d'une fonction f c'est calculer l'expression mathématique suivante :

$$f'(x_0) = \lim_{\substack{x \to x_0 \\ x \neq x_0}} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$$

Ce qui correspond, graphiquement, au coefficient directeur de la tangente à la courbe représentant $f(x)$ en x_0 (voir ci-contre).



En sciences physiques, la dérivée de f par rapport à x s'écrit $\frac{df}{dx}$ (« d » signifie différence infinitésimale).

La dérivée seconde de f par rapport à x s'écrit : $\frac{d^2f}{dx^2}$ (la fonction f est dérivée deux fois de suite par rapport à x).

• En sciences physiques, il est fréquent de dériver par rapport au temps. Pour alléger l'écriture, plutôt que d'écrire $\frac{df}{dt}$ ou $\frac{d^2f}{dt^2}$, on utilisera parfois la notation de Newton : respectivement $\dot{f}$ et $\ddot{f}$ (qui se lisent « f point » et « f point point »).

• Lorsqu'il s'agira de dériver dans l'espace, on utilisera parfois les écritures f' et f'', déjà utilisées en cours de mathématiques.

2 Quelques exemples « usuels » de dérivation de fonctions en sciences physiques

$f(t)$	$a \cdot t^2$	$a \cdot t$	a	$k \cdot \sin(x)$	$k \cdot \cos(x)$	$\ln(x)$	e^x
$f'(t)$	$2a \cdot t$	a	0	$k \cdot \cos(x)$	$-k \cdot \sin(x)$	$\frac{1}{x}$	e^x

3 Dérivation de vecteurs

La dérivation d'un vecteur est utilisée notamment en mécanique, pour exprimer les vecteurs vitesse et accélération. Si on admet que l'on peut dériver les coordonnées d'un vecteur $\vec{u}$, alors les coordonnées du vecteur $\vec{u}'$ sont simplement les dérivées des coordonnées du vecteur $\vec{u}$.

EXEMPLE

Si $\overrightarrow{OM} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$ alors $\vec{v} = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt} = \frac{dx}{dt}\vec{i} + \frac{dy}{dt}\vec{j} + \frac{dz}{dt}\vec{k} = \dot{x}\vec{i} + \dot{y}\vec{j} + \dot{z}\vec{k}$

FICHE MÉTHODE 5 MATHS

Représentation paramétrique d'une courbe

1 Comment établir les équations horaires du mouvement d'un système ?

Pour décrire le mouvement d'un système, on exprime ses vecteurs position $\overrightarrow{OM}(t)$ et vitesse $\vec{v}(t)$ dans un repère. Les équations des coordonnées de $\overrightarrow{OM}(t)$ et $\vec{v}(t)$ sont appelées **équations horaires** ; ce sont des équations **paramétriques fonction du temps** t.

Quel repère utiliser ?

(Si le repère n'est pas imposé). Choisir un repère cartésien (O, x, y, z) direct tel que l'axe z soit vertical et que le vecteur vitesse initiale $\vec{v}_0$ ait au moins une composante nulle selon l'un des axes Ox ou Oy. Choisir la position initiale du système en tant qu'origine O du repère.

Équations horaires du vecteur vitesse $\vec{v}(t)$

1. Appliquer la 1re ou la 2e **loi de Newton** dans un **référentiel galiléen** et exprimer le vecteur accélération $\vec{a}(t)$.
2. Écrire dans le repère cartésien les expressions des coordonnées du vecteur $\vec{a}(a_x, a_y, a_z)$.
3. Écrire la **1re équation différentielle** : $\vec{a}(t) = \dfrac{d\vec{v}}{dt}$. Par **intégration**, exprimer $\vec{v}$ en un jeu de trois **primitives** $v_x(t)$, $v_y(t)$ et $v_z(t)$ définies chacune à une constante près.
4. Utiliser les **conditions** de l'énoncé pour identifier chaque constante : le plus souvent à partir des coordonnées du vecteur vitesse initial $\vec{v}_0$ obtenues par projection.
5. Écrire l'expression finale des coordonnées de $\vec{v}(t)$ dans le repère.

Équations horaires du vecteur position $\overrightarrow{OM}(t)$

6. Écrire la **2de équation différentielle** :
$$\vec{v}(t) = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt}$$
7. Par une **2de intégration**, exprimer les coordonnées de $\overrightarrow{OM}(t)$ en trouvant un jeu de trois primitives $x(t)$, $y(t)$ et $z(t)$ définies chacune à une constante près.
8. Utiliser les **conditions** de l'énoncé pour déterminer chacune des constantes : le plus souvent la **position initiale** de coordonnées $x(0)$, $y(0)$ et $z(0)$.
9. Écrire l'expression finale des coordonnées $x(t)$, $y(t)$ et $z(t)$ du vecteur position $\overrightarrow{OM}(t)$ dans le repère.

2 Comment déterminer une primitive ?

Dérivée	$\dfrac{df}{dt} = 0$	$\dfrac{df}{dt} = D$ (avec D constante)	$\dfrac{df}{dt} = F \cdot t$ (avec F constante)
Primitive	$f(t) = C$ (avec C constante)	$f(t) = D \cdot t + E$ (avec E constante)	$f(t) = \dfrac{1}{2} \cdot F \cdot t^2 + G$ (avec G constante)

3 Comment utiliser la représentation paramétrique d'une courbe ?

Selon l'énoncé, il faut :

- à partir des équations horaires $x(t)$, $y(t)$ ou $z(t)$, « éliminer » la variable t en faisant une substitution dans l'une des équations pour établir **l'équation de la courbe trajectoire** en fonction de x, y ou z ;
- résoudre l'équation $z(t) = h$ pour déterminer l'instant t auquel le système atteint **l'altitude** h. Puis en déduire la position correspondante de coordonnées $x(t)$, $y(t)$ ou $z(t)$;
- résoudre l'équation $v_z(t) = 0$ pour déterminer **l'instant** t correspondant **au sommet de la trajectoire**. Puis obtenir les caractéristiques du mouvement en ce point à l'aide des expressions $\overrightarrow{OM}(t)$ et $\vec{v}(t)$.

FICHE MÉTHODE 6

Utiliser les puissances de 10 et la notation scientifique

Pour exprimer les dimensions des objets infiniment petits (comme l'atome) ou infiniment grands (comme une galaxie), on a recours aux puissances de 10.

1 Multiples et sous-multiples des unités

On peut traduire les puissances de 10 par des multiples et des sous-multiples des unités du Système international.

Préfixe	Symbole	Puissance de 10
téra	T	$\times 10^{12}$
		$\times 10^{11}$
		$\times 10^{10}$
giga	G	$\times 10^{9}$
		$\times 10^{8}$
		$\times 10^{7}$
méga	M	$\times 10^{6}$
		$\times 10^{5}$
		$\times 10^{4}$
kilo	k	$\times 10^{3}$
hecto	h	$\times 10^{2}$
déca	da	$\times 10^{1}$
		$\times \mathbf{10^{0}}$
déci	d	$\times 10^{-1}$
centi	c	$\times 10^{-2}$
milli	m	$\times 10^{-3}$
		$\times 10^{-4}$
		$\times 10^{-5}$
micro	µ	$\times 10^{-6}$
		$\times 10^{-7}$
		$\times 10^{-8}$
nano	n	$\times 10^{-9}$
		$\times 10^{-10}$
		$\times 10^{-11}$
pico	p	$\times 10^{-12}$
		$\times 10^{-13}$
		$\times 10^{-14}$
femto	f	$\times 10^{-15}$

EXEMPLE Multiples et sous-multiples du mètre.

Unité	Symbole	Conversion en m	
téramètre	Tm	$\times 10^{12}$ m	1 000 000 000 000 m
		$\times 10^{11}$ m	100 000 000 000 m
		$\times 10^{10}$ m	10 000 000 000 m
gigamètre	Gm	$\times 10^{9}$ m	1 000 000 000 m
		$\times 10^{8}$ m	100 000 000 m
		$\times 10^{7}$ m	10 000 000 m
mégamètre	Mm	$\times 10^{6}$ m	1 000 000 m
		$\times 10^{5}$ m	100 000 m
		$\times 10^{4}$ m	10 000 m
kilomètre	km	$\times 10^{3}$ m	1 000 m
hectomètre	hm	$\times 10^{2}$ m	100 m
décamètre	dam	$\times 10^{1}$ m	10 m
mètre	**m**	$\times \mathbf{10^{0}}$ **m**	**1 m**
décimètre	dm	$\times 10^{-1}$ m	0,1 m
centimètre	cm	$\times 10^{-2}$ m	0,01 m
millimètre	mm	$\times 10^{-3}$ m	0,001 m
		$\times 10^{-4}$ m	0,000 1 m
		$\times 10^{-5}$ m	0,000 01 m
micromètre	µm	$\times 10^{-6}$ m	0,000 001 m
		$\times 10^{-7}$ m	0,000 000 1 m
		$\times 10^{-8}$ m	0,000 000 01 m
nanomètre	nm	$\times 10^{-9}$ m	0,000 000 001 m
		$\times 10^{-10}$ m	0,000 000 000 1 m
		$\times 10^{-11}$ m	0,000 000 000 01 m
picomètre	pm	$\times 10^{-12}$ m	0,000 000 000 001 m
		$\times 10^{-13}$ m	0,000 000 000 000 1 m
		$\times 10^{-14}$ m	0,000 000 000 000 01 m
femtomètre	fm	$\times 10^{-15}$ m	0,000 000 000 000 001 m

2 Écriture scientifique d'un nombre

En écriture scientifique, tout nombre s'écrit comme le produit d'un nombre compris entre 1 et 10 (10 exclu) et d'une puissance de 10.

EXEMPLE L'écriture scientifique du nombre 0,000 027 est $2{,}7 \times 10^{-5}$.

$a \times 10^{n}$ avec $1 \leqslant a < 10$
et n entier positif ou négatif

FICHE MÉTHODE 7

Exprimer les incertitudes de mesure

1 Écrire un résultat de mesure

a. Variabilité d'une mesure physique

Une mesure ne peut jamais conduire à une valeur vraie, rigoureusement certaine, mais seulement à des valeurs approchées. On parle de **variabilité** ou de **dispersion** d'une mesure.

Pour évaluer la dispersion d'une mesure, on utilise une grandeur appelée **incertitude-type**. Elle traduit le doute qui existe entre le résultat de cette mesure et la valeur vraie.

L'incertitude-type définit un **intervalle** dans lequel la valeur « vraie » se trouve probablement.

L'incertitude-type est généralement notée u et elle est arrondie en conservant généralement 1 chiffre significatif. Le résultat de la mesure est alors arrondi à la même décimale.

b. Valeur mesurée et valeur de référence

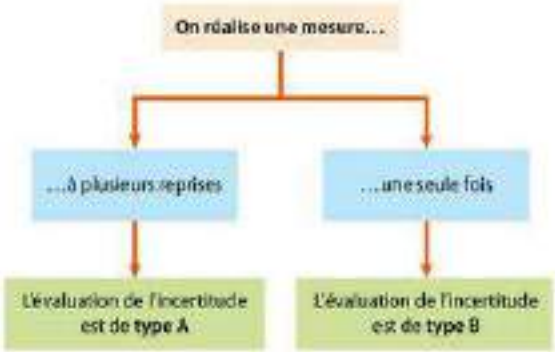
Lorsque l'on dispose du résultat x_{mes} d'une mesure et de son incertitude-type $u(x)$, il est possible de comparer ce résultat à une valeur de référence x_{ref}. Cette valeur peut-être par exemple prévue théoriquement, indiquée par le fabriquant ou extraite de travaux scientifiques.

Pour comparer quantitativement ces valeurs, on calcule le rapport Q suivant :

$$Q = \frac{|x_{mes} - x_{ref}|}{u(x)}$$

À partir de ce calcul on pourra dire que la valeur mesurée et la valeur de référence sont compatibles à $Q \cdot u(x)$ près.

c. Deux méthodes d'évaluation de l'incertitude-type



2 Exploiter une série de plusieurs mesures : évaluation de type A

a. Série de mesures

La variabilité d'une mesure apparaît lorsque l'on répète plusieurs fois la mesure d'une même grandeur dans les mêmes conditions expérimentales.

EXEMPLE

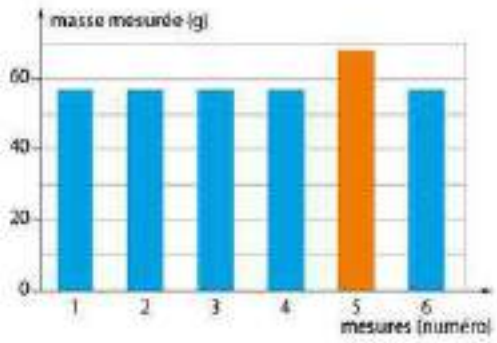
Si l'on mesure à plusieurs reprises la masse d'un échantillon, le résultat affiché par la balance peut varier. Cela s'explique par de nombreux paramètres :
- fonctionnement de l'instrument,
- position de l'échantillon sur le plateau,
- limite de l'affichage,
- température de la pièce,
- etc.

Mesure n°	1	2	3	4	5	6
Masse (g)	57,2	57,2	56,8	57,4	58,2	57,0

b. Analyse qualitative : l'histogramme

À l'aide d'un tableur, on illustrera la variabilité d'une mesure en réalisant un **histogramme**. Un histogramme donne la fréquence d'occurrence pour chaque valeur mesurée. Il permet de se rendre compte de l'ampleur de la dispersion des valeurs des mesures effectuées.

Quand un résultat dans une série de mesures est très éloigné des autres, on dit qu'il est aberrant. Il devra être écarté afin de réduire la dispersion.

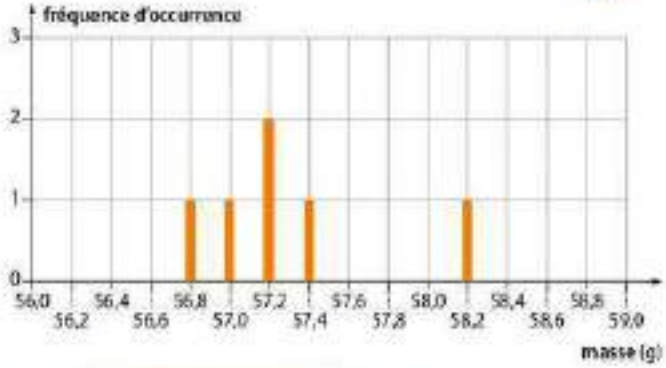


EXEMPLE

Dans l'exemple précédent, les mesures sont assez peu dispersées sauf la mesure n° 5.

On dira que le résultat de la mesure n° 5, qui est très éloigné des autres, est aberrant.





Il est souvent possible de réduire la dispersion des mesures :
- en respectant les règles d'utilisation optimale de l'instrument ;
- en utilisant un instrument de mesure plus performant ;
- en améliorant la précision du protocole expérimental.

a. Calculer l'incertitude-type sur une série de mesures

Lorsque l'on réalise plusieurs mesures d'une même grandeur, il est possible de calculer la meilleure estimation du résultat ainsi que la valeur de l'incertitude-type associée. Pour cela, on utilise les outils statistiques des calculatrices scientifiques de la façon suivante :



Au lycée, on écrit les incertitudes en respectant les règles suivantes :
- l'incertitude-type d'une mesure est écrite avec **un ou deux chiffres significatifs** ;
- l'incertitude-type est **arrondie**, par excès, **à la même décimale que la valeur mesurée**.



EXEMPLE

Sur l'exemple précédent où l'on mesure une masse m, on a conservé cinq valeurs. On a donc $N = 5$.

On calcule la moyenne $\overline{m}$ et l'écart-type expérimental s_m en utilisant le menu statistique de la calculatrice (figure ci-contre) :

$$\overline{m} = 57{,}2 \quad \text{et} \quad s_m = 0{,}38078...$$

On calcule l'incertitude-type :

$$u(m) = \frac{s_m}{\sqrt{N}}$$

soit $$u(m) = \frac{0{,}38078}{\sqrt{5}} = 0{,}17029...$$

On écrit le résultat final : la masse vaut $m = 57{,}2$ g avec une incertitude-type de 0,2 g.

VERS L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR...

Dans le domaine scientifique, les incertitudes sont généralement données pour garantir un niveau de confiance se rapprochant de 100 %.

Pour atteindre cet objectif, les incertitudes-types u_x sont remplacées par les ***incertitudes élargies U(X)****.*

Ces deux grandeurs sont reliées par un coefficient k appelé coefficient de Student :

$$U(X) = k \times u(X)$$

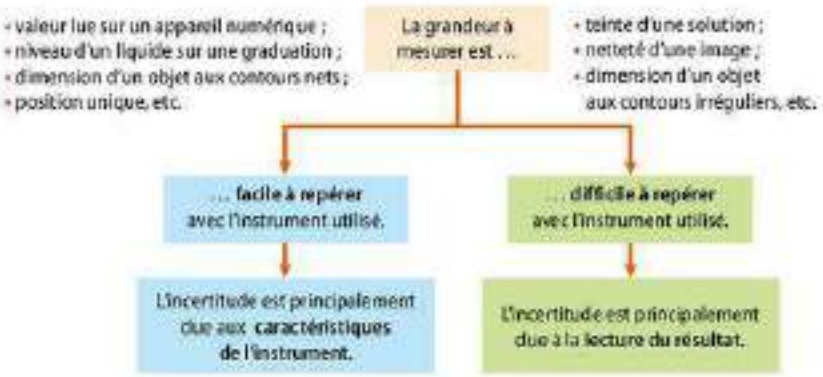
Pour un niveau de confiance de 95 %, $k = 2$.

3 Exploiter une mesure unique : évaluation de type B

a. Principales sources d'incertitude sur le résultat d'une mesure

Dans de nombreuses activités expérimentales, il n'est pas possible de réaliser plusieurs fois la mesure d'une grandeur pour observer sa variabilité. Par exemple, lorsqu'on ne dispose pas de matériel suffisant ou quand la réalisation d'une mesure demande trop de temps pour être répétée.

Dans ces conditions, il faut se contenter d'une mesure unique de la grandeur étudiée pour laquelle il est néanmoins possible obtenir une estimation d'une incertitude-type. Deux cas sont possibles dans les activités expérimentales du lycée :



b. Évaluer l'incertitude-type lorsque la grandeur est facile à repérer

Souvent, la grandeur mesurée est suffisamment nette et stable pour être repérée sans difficulté. Dans ce cas, on considère que l'incertitude sur la mesure est principalement due à la précision avec laquelle l'instrument permet de lire le résultat.

En première approximation, il est donc possible d'estimer l'incertitude type de la façon suivante :

Pour un **instrument gradué** (règle, thermomètre, pipette, etc.), l'utilisateur identifie la plus petite graduation visible.

L'incertitude-type est égale à la moitié de la plus petite graduation visible :

$$u = \frac{\text{graduation}}{2}$$

Pour un instrument à **affichage numérique** (multimètre, conductimètre, balance, etc.), on identifie le dernier chiffre affiché (digit).

L'incertitude-type est égale à la moitié du dernier chiffre affiché :

$$u = \frac{\text{digit}}{2}$$

c. Évaluer l'incertitude-type lorsque la grandeur est difficile à repérer

Lors de la réalisation d'expériences, il est courant de ne pas pouvoir donner un résultat unique pour une mesure. Par exemple, lorsque la valeur affichée par l'instrument varie ou quand la grandeur mesurée n'a pas de limites nettes, etc. Il est alors seulement possible d'estimer **un intervalle** dans lequel le résultat se trouve très probablement.

Dans ce cas, on considère que l'incertitude est principalement due à l'impossibilité de l'observateur à réduire cet intervalle.

En première approximation, il est donc possible d'estimer l'incertitude-type de la façon suivante :

- L'utilisateur identifie la valeur la plus petite X_{min} et la plus grande X_{max} entre lesquelles le résultat de la mesure peut être raisonnablement encadré.
- Le **résultat** X de la mesure est égal au milieu de l'intervalle :

$$X = \frac{X_{max} + X_{min}}{2}$$

- L'**incertitude-type** u_X est égale à la moitié de la largeur de l'intervalle :

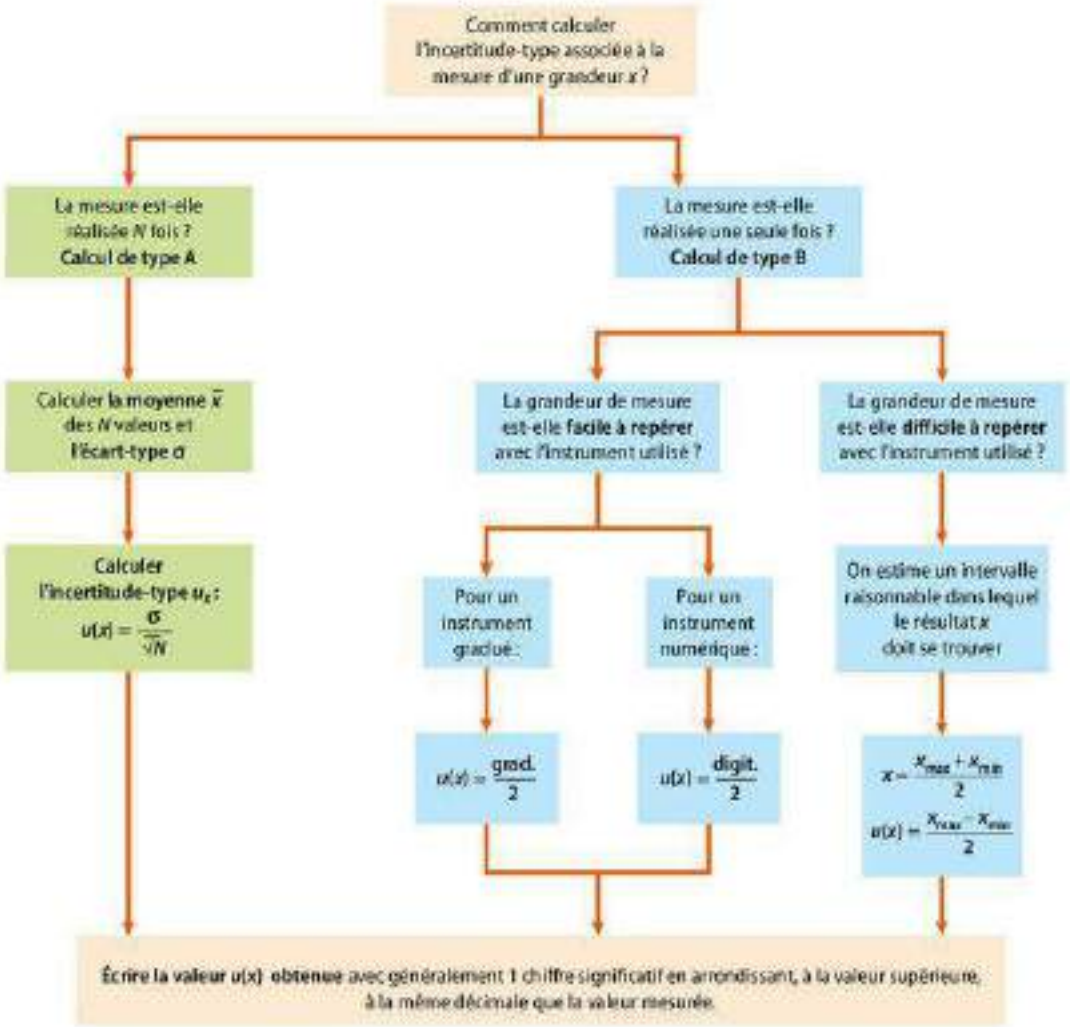
$$u(x) = \frac{X_{max} - X_{min}}{2}$$

4 Incertitudes-types composées

Lorsqu'une grandeur est déterminée par un calcul à partir d'autres grandeurs mesurées, son incertitude-type se calcule de la manière suivante :

La grandeur X se calcule ...	Calcul de l'incertitude-type
... comme la somme algébrique de grandeurs A et B : $X = A \pm B$	Pour une somme ou une différence les carrés des incertitudes-types s'ajoutent. $u(x)^2 = u(A)^2 + u(B)^2$
... comme le produit ou le quotient de grandeurs A, B et C : $X = \frac{A \cdot B}{C}$	Pour un produit ou un quotient les carrés des incertitudes-types divisé par la valeur s'ajoutent. $\left(\frac{u(x)}{X}\right)^2 = \left(\frac{u(A)}{A}\right)^2 + \left(\frac{u(B)}{B}\right)^2 + \left(\frac{u(C)}{C}\right)^2$

5 Pour réussir à calculer une incertitude-type



FICHE MÉTHODE 8

Gérer les chiffres significatifs et la notation scientifique

En physique, toute grandeur numérique est une grandeur mesurée. Cette mesure est effectuée avec une certaine précision. Cela a une conséquence sur l'écriture du résultat.

1 Nombre de chiffres significatifs

Le nombre de chiffres significatifs indique la précision d'une mesure. Les chiffres significatifs sont les chiffres connus avec certitude et le premier chiffre incertain.

EXEMPLE

La mesure « 1,32 m » comporte 3 chiffres significatifs. Les chiffres 1 et 3 sont connus avec certitude.
Le chiffre 2 est incertain.

2 Particularité du « zéro »

Lorsque le premier chiffre de gauche est un zéro, ce zéro n'est pas significatif.

Lorsque le dernier chiffre de droite est un zéro, ce zéro est significatif.

EXEMPLE

La mesure « 0,42 m » ne comporte que 2 chiffres significatifs.
La mesure « 2,30 m » comporte 3 chiffres significatifs.

3 Calcul et chiffres significatifs

a. Multiplication et division

Le résultat d'une multiplication ou d'une division a autant de chiffres significatifs que la mesure la moins précise utilisée dans le calcul.

EXEMPLE

On donne une vitesse v et une distance parcourue d : $v = 3{,}2\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; $d = 10{,}2\ \text{m}$.

La durée du déplacement s'écrit : $\Delta t = \dfrac{d}{v}$.

d est connu avec 3 chiffres significatifs ; v, avec seulement 2 chiffres significatifs. La mesure la moins précise est celle de v.

Le résultat de Δt ne sera donc donné qu'avec 2 chiffres significatifs : $\dfrac{10{,}2}{3{,}2} = 3{,}1875$, que l'on arrondit donc à 3,2 : $\Delta t = \mathbf{3{,}2\ s}$.

b. Addition et soustraction

Le résultat d'une addition ou d'une soustraction a autant de décimales que la mesure présente dans le calcul qui en a le moins.

EXEMPLE

On donne deux longueurs $L = 23{,}12\ \text{m}$ et $\ell = 0{,}821\ \text{m}$.
La mesure qui a le moins de décimales est 23,12 (2 décimales).

$L - \ell = 23{,}12 - 0{,}821 = 22{,}299$, que l'on arrondit donc à 22,30 : $\boldsymbol{L - \ell = 22{,}30\ \text{m}}$.

4 La notation scientifique

- La notation scientifique consiste à exprimer un nombre sous la forme :

$$\boldsymbol{a \times 10^{b}} \quad \text{avec} \quad 1 \leqslant a < 10$$
et b entier relatif non nul

EXEMPLE

En notation scientifique, 0,0025 s'écrit : $2{,}5 \times 10^{-3}$.

- a doit être compris entre 1 (inclus) et 10 (exclu).

EXEMPLE

La valeur 1,5 est déjà une notation scientifique.
On n'écrira pas : $1{,}5 \times 10^{0}$.

- Pour exprimer un nombre en puissance de 10, la relation mathématique suivante peut être utile :

$$\boldsymbol{10^{n} \times 10^{m} = 10^{n+m}}$$

EXEMPLE

Pour convertir 100 mm en m et utiliser la notation scientifique, on écrit :
$100\ \text{mm} = 1 \times 10^{2}\ \text{mm} = 1 \times 10^{2} \times 10^{-3}\ \text{m} = 1 \times 10^{-1}\ \text{m}$

- Dans l'écriture scientifique $a \times 10^{b}$, c'est le nombre de chiffres de a qui donne le nombre de chiffres significatifs.

EXEMPLE

$3{,}00 \times 10^{8}\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ comporte 3 chiffres significatifs.

FICHE MÉTHODE 9

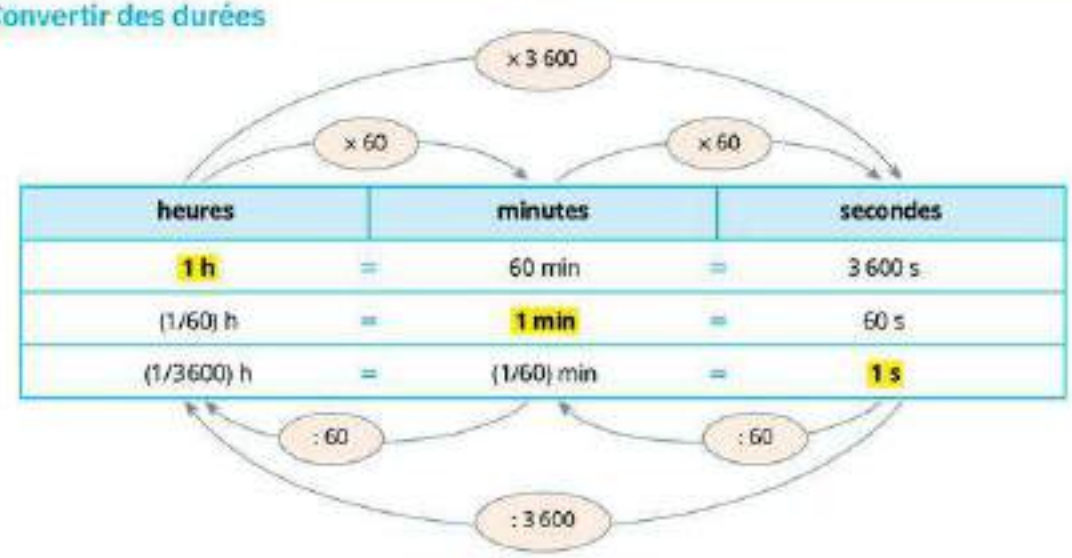
Convertir des grandeurs

1 Convertir des volumes

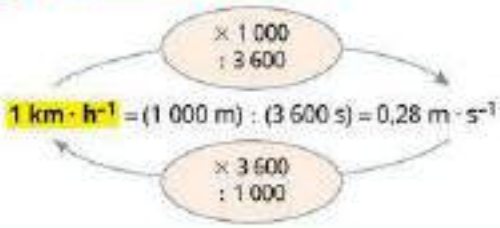
mètre cube			décimètre cube			centimètre cube			millimètre cube		
m^3			dm^3			cm^3			mm^3		
100	10	1	100	10	1	100	10	1	100	10	1
								1 000 mm^3	100 mm^3	10 mm^3	**1 mm^3**
					1 000 cm^3	100 cm^3	10 cm^3	**1 cm^3**	0,1 cm^3	0,01 cm^3	0,001 cm^3
		1 000 dm^3	100 dm^3	10 dm^3	**1 dm^3**	0,1 dm^3	0,01 dm^3	0,001 dm^3			
100 m^3	10 m^3	**1 m^3**	0,1 m^3	0,01 m^3	0,001 m^3						

			hectolitre	décalitre	litre	décilitre	centilitre	millilitre			
			hL	daL	L	dL	cL	mL			
			100 L	10 L	**1 L**	0,1 L	0,01 L	0,001 L			

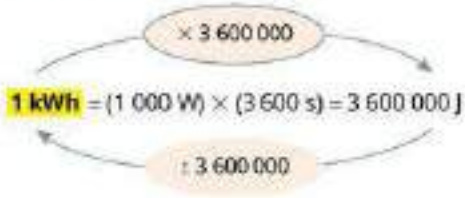
2 Convertir des durées



3 Convertir des vitesses



4 Convertir des énergies



FICHE MÉTHODE 10

Réaliser une analyse dimensionnelle

En science, l'analyse dimensionnelle est une méthode qualitative permettant de relier toute grandeur à un ensemble de sept grandeurs indépendantes appelées dimensions.

1 Les unités du système international (SI)

Le Système international d'unités, aussi appelé « unités SI » est le système d'unités de mesure adopté à l'échelle mondiale pour toutes les activités humaines aussi bien scientifiques qu'économiques.

Ce système repose sur sept **dimensions** indépendantes les unes des autres.

Il est possible d'exprimer toutes les grandeurs physiques à partir de ces dimensions de base.



Dimension		Unité
Grandeur	Symbole	
temps	T	seconde (s)
longueur	L	mètre (m)
masse	M	kilogramme (kg)
intensité du courant électrique	I	ampère (A)
température	Θ	kelvin (K)
quantité de matière	N	mole (mol)
intensité lumineuse	J	candela (cd)

2 Homogénéité et analyse dimensionnelle

En science, deux grandeurs sont dites **homogènes** lorsqu'elles ont la **même dimension**.
Cela implique donc deux conséquences pratiques :
- les deux membres d'une équation doivent avoir la même dimension ;
- il n'est possible d'ajouter ou de soustraire que des grandeurs de même dimension.

Le raisonnement qui exploite ces contraintes ou qui permet de s'assurer qu'elles sont respectées s'appelle **l'analyse dimensionnelle**.

Lorsque l'on réalise une analyse dimensionnelle, la dimension d'une grandeur X s'écrit **dim** X.



Il ne faut pas confondre la dimension d'une grandeur et son unité.

EXEMPLE

La vitesse moyenne v est égale au rapport de la distance parcourue D sur la durée du parcours τ :

$$v = \frac{D}{\tau}.$$

La dimension de v s'écrit :

$$\dim v = \frac{\dim D}{\dim \tau} = \frac{L}{T} = L \cdot T^{-1}.$$

La vitesse a la dimension d'une longueur par unité de temps.

EXEMPLE

L'expression du poids permet de connaître la dimension d'une force :

$$P = m \cdot g \text{ donc } \dim P = \dim m \cdot \dim g$$
$$\dim P = M \cdot L \cdot T^{-2}.$$

L'unité Newton (N) est donc associée à une masse multipliée par une longueur divisée par une durée au carré.

FICHE MÉTHODE 11

Suivre l'évolution d'une transformation chimique

Le tableau d'avancement constitue un outil pratique pour suivre le déroulement d'une réaction chimique.

1 Avancement chimique

Au cours de la réaction, des réactifs disparaissent et des produits apparaissent.

L'évolution du système chimique est caractérisée par l'**avancement** de la réaction, noté x, et exprimé en mole.

C'est une grandeur qui décrit l'état du système chimique au cours de la transformation. L'avancement passe de la valeur 0 à l'instant initial à x_f sa valeur **finale**.

2 Composition du système chimique

Pour connaître la composition du système chimique à différents moments au cours de la transformation, on peut établir un **tableau** d'avancement dans lequel figurent les **quantités de matière** des réactifs et des produits.

	CH_4 (g)	+	$2\,O_2$ (g)	⇄	CO_2 (g)	+	$2\,H_2O$ (g)
État	**Avancement**	**Quantités de matière** (mol)					
initial	$x = 0$	n_1		n_2	n_3		n_4
en cours de transformation	x	$n_1 - x$		$n_2 - 2x$	$n_3 + x$		$n_4 + 2x$
final	x_f	$n_1 - x_f$		$n_2 - 2x_f$	$n_3 + x_f$		$n_4 + 2x_f$

On atteint l'état final du système chimique lorsque les quantités de matière des réactifs et des produits de la réaction n'évoluent plus : on a alors $x = x_f$.

3 Transformation totale

Lors d'une transformation chimique totale, l'état final est atteint lorsqu'un des réactifs, le **réactif limitant**, est épuisé. Dans ce cas, $x_f = x_{max}$, où x_{max} est l'avancement **maximal**.

Les quantités de matière des réactifs diminuent jusqu'à ce que l'une d'elles s'annule, ce qui permet de déterminer x_{max} et le réactif limitant.

	CH_4 (g)	+	$2\,O_2$ (g)	→	CO_2 (g)	+	$2\,H_2O$ (g)
État	**Avancement**	**Quantités de matière** (mol)					
initial	$x = 0$	2		3	0		0
en cours de transformation	x	$2 - x$		$3 - 2x$	x		$2x$
final	x_{max}	$2 - x_{max}$		$3 - 2x_{max}$	x_{max}		$2x_{max}$

Remarque : Il existe un état final particulier pour lequel tous les réactifs initialement introduits sont consommés. Il correspond à un mélange des réactifs dans les proportions qui sont celles des nombres stœchiométriques.

FICHE MÉTHODE 12

Ajuster une équation chimique

L'écriture de l'équation chimique d'une réaction doit respecter à la fois les lois de conservation des éléments et de conservation de la charge électrique.

1 Qu'est-ce qu'une équation chimique ?

Une équation chimique est l'écriture symbolique de la réaction chimique. Pour l'établir :

1. on place les **réactifs** à gauche et les **produits** à droite d'une **flèche** qui indique le sens d'évolution du système lors de la réaction ;

2. les réactifs et les produits sont représentés par leurs **formules brutes**, qui ne peuvent être modifiées ;

3. on précise **l'état physique** de chaque espèce chimique : solide (s), liquide (ℓ), gazeux (g) ou en solution aqueuse (aq).

EXEMPLE

$C\,(s) + O_2\,(g) \rightarrow CO_2\,(g)$

Réactifs — Produit(s)

2 Conservation des éléments

- Pour chaque type d'atome, on doit retrouver le même nombre d'atomes dans les réactifs et les produits. On dit alors que **l'équation est ajustée**.
- Sinon, il faut placer, devant les formules des réactifs et/ou des produits, des **nombres stœchiométriques** afin d'ajuster l'équation. Ces nombres doivent être entiers.

EXEMPLE

$C\,(s) + O_2\,(g) \rightarrow CO_2\,(g)$

1 C — 2 O — 1 C et 2 O

EXEMPLES

$H_2\,(g) + O_2\,(g) \rightarrow H_2O\,(\ell)$

2 H — 2 O — 2 H et 1 O

équation non ajustée

$2\,H_2\,(g) + O_2\,(g) \rightarrow 2\,H_2O\,(\ell)$

4 H — 2 O — 4 H et 2 O

équation ajustée

Remarque : les nombres stœchiométriques égaux à 1 ne sont pas écrits.

3 Conservation de la charge électrique

Si des ions sont mis en jeu, comme lors de la dissolution d'un solide ionique dans l'eau, la conservation de la charge électrique est aussi vérifiée.

EXEMPLE

$CuCl_2\,(s) \rightarrow Cu^{2+}\,(aq) + 2\,Cl^-\,(aq)$

1 Cu et 2 Cl — 1 Cu — 2 Cl ← conservation des atomes

$q = 0$ C — $q = +2e - 2e = 0$ C ← conservation de la charge

FICHE MÉTHODE 13

Écrire l'équation d'une réaction d'oxydoréduction

Une réaction d'oxydoréduction met en jeu un transfert d'électrons entre les réactifs, qui appartiennent à deux couples oxydant-réducteur Ox_1/Red_1 et Ox_2/Red_2.

1 Demi-équations électroniques

Comme pour l'écriture d'une équation de réaction, il est nécessaire d'ajuster les demi-équations électroniques de façon à respecter la conservation des éléments et de la charge électrique.

1. Placer les 2 espèces chimiques du couple à gauche et à droite d'un signe **égal** :

$Cr_2O_7^{2-}$ (aq) = Cr^{3+} (aq)

Couple $Cr_2O_7^{2-}$ (aq)/Cr^{3+} (aq)

2. A l'aide des nombres stœchiométriques, assurer la conservation des **éléments** autres que H et O :

$Cr_2O_7^{2-}$ (aq) = 2 Cr^{3+} (aq)

3. L'élément oxygène O se conserve par ajout de molécules d'eau H_2O (ℓ) :

$Cr_2O_7^{2-}$ (aq) = 2 Cr^{3+} (aq) + 7 H_2O (ℓ)

4. L'élément hydrogène H se conserve par ajout d'ions H^+ (aq) :

$Cr_2O_7^{2-}$ (aq) + 14 H^+ (aq) = 2 Cr^{3+} (aq) + 7 H_2O (ℓ)

5. La conservation de la charge est effectuée par ajout d'électrons e^- :

$Cr_2O_7^{2-}$ (aq) + 14 H^+ (aq) + 6 e^- = 2 Cr^{3+} (aq) + 7 H_2O (ℓ)

ajustée

2 Équation-bilan

Pour obtenir l'équation de la réaction d'oxydoréduction :

1. Placer les 2 demi-équations l'une en dessous de l'autre en mettant l'oxydant et le réducteur de la réaction à gauche :

2 H^+ (aq) + 2 e^- = H_2 (g)
Al (s) = Al^{3+} (aq) + 3 e^-

Couples H^+ (aq)/H_2 (g)
et Al^{3+} (aq)/Al (s)

2. Multiplier les demi-équations par un coefficient afin d'avoir le même nombre d'électrons de chaque côté :

2 H^+ (aq) + 2 e^- = H_2 (g) (×3)
Al (s) = Al^{3+} (aq) + 3 e^- (×2)

3. Additionner les 2 demi-équations électroniques et simplifier :

ajustée

6 H^+ (aq) + 6 e^- = 3 H_2 (g)
2 Al (s) = 2 Al^{3+} (aq) + 6 e^-

6 H^+ (aq) + 2 Al (s) → 3 H_2 (g) + 2 Al^{3+} (aq)

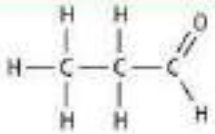
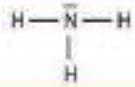
FICHE MÉTHODE 14

Représenter des molécules

Quelles représentations peuvent être utilisées pour rendre compte de la structure des molécules ?

1 Différentes formules

Elles ont l'avantage de permettre une représentation très simple des molécules, mais ne donnent pas toutes les informations sur leur géométrie.

Type de formule	Représentation des liaisons entre atomes	Exemple
Brute	Non	C_2H_7N
Semi-développée	Oui, sauf celles de l'hydrogène	$HC \equiv C - OH$
Développée	Oui	
Schéma de Lewis	Oui, et représentation des doublets non liants	

2 Modèles moléculaires

Les modèles moléculaires permettent de représenter les molécules afin de visualiser l'arrangement à trois dimensions des atomes qui les constituent.

Ce sont des représentations fondées sur un code de couleurs et de formes. Les atomes sont représentés par des sphères colorées.





Les modèles éclatés permettent de bien visualiser la structure de la molécule, les liaisons chimiques et surtout l'orientation dans l'espace de ces liaisons.





Dans les modèles compacts, les sphères colorées représentent le volume total du cortège électronique des atomes. Ils sont donc plus proches de la réalité et rendent compte correctement de l'encombrement des atomes dans l'espace.

3 Logiciels de représentation moléculaire

Des logiciels de représentation permettent également de modéliser les molécules et de les faire tourner. On peut ainsi visualiser les molécules sous différents angles.

Avogadro est un de ces logiciels.

a. Construire une molécule

- Cliquer sur le crayon de la barre d'outils :



- Sélectionner l'élément à représenter dans les «Paramètres de dessin» :

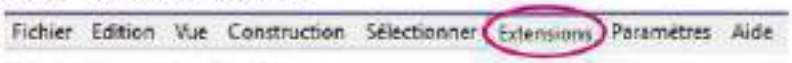


Remarque : pour représenter des ions polyatomiques, il faut décocher la case «Ajuster les hydrogènes» dans les «Paramètres de dessin».

- Cliquer sur la zone de dessin.
- Pour représenter un deuxième élément de la molécule, le sélectionner dans les «Paramètres de dessin», puis cliquer-déplacer sur la zone de dessin à partir du premier élément représenté.
- On peut modifier la multiplicité de la liaison formée en cliquant dessus : elle devient double, puis triple, puis à nouveau simple.
- Et ainsi de suite jusqu'à représenter tous les atomes et toutes les liaisons de la molécule.

b. Optimiser la géométrie

- Cliquer sur «Extensions» dans la barre d'outils :



- Puis cliquer sur «Optimisation de la géométrie» :



- La molécule apparaît alors sous sa géométrie réelle.

c. Visualiser la molécule

- Cliquer sur l'étoile de la barre d'outils :



- Un clic gauche maintenu permet de faire tourner la molécule en déplaçant la souris.
- Un clic droite maintenu permet de faire translater la molécule en déplaçant la souris.
- Le bouton central de la souris permet de zoomer/dézoomer sur la molécule en faisant tourner la molette.

FICHE MÉTHODE 15

Nommer les molécules organiques

On estime à plus de 15 millions le nombre de composés organiques connus. Aussi l'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC) a-t-elle adopté des règles précises de nomenclature.

1 Les alcanes

Formule des alcanes non cycliques C_nH_{2n+2}

Alcanes linéaires

Préfixe ***nombre d'atomes de carbone*** + terminaison ***ane***

Formule	Nom
CH_4	méthane
C_2H_6	éthane
C_3H_8	propane
C_4H_{10}	butane
C_5H_{12}	pentane

Exemples d'alcanes linéaires

Alcanes ramifiés

1. Rechercher la chaîne principale.
C'est la chaîne carbonée la plus longue dans la molécule. Cette chaîne sera nommée de la même façon que l'alcane linéaire ayant le même nombre d'atomes de carbone.

2. Repérer les ramifications.
Ce sont des groupes alkyles (groupes hydrocarbonés dérivés des alcanes) notés R.

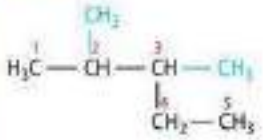
3. Numéroter la chaîne principale.
Les atomes de carbone portant des ramifications doivent avoir les numéros les plus petits possibles.

4. Le nom est composé du nom de la chaîne principale, précédé du nom des groupes alkyles.
Lorsque le même groupe apparaît plusieurs fois, on lui ajoute un préfixe multiplicatif (di-, tri-, tétra-).
Les noms des groupes alkyles sont classés par ordre alphabétique, sans tenir compte du préfixe multiplicatif. Ils sont précédés du numéro de leur place sur la chaîne principale et le -e final de leur nom est supprimé.

Formule	Nom
$-CH_3$	méthyle
$-C_2H_5$	éthyle
$-C_3H_7$	propyle
$-C_4H_9$	butyle
$-C_5H_{11}$	pentyle

Exemples de groupes alkyles R

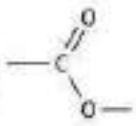
EXEMPLE



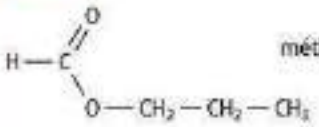
2,3-diméthylpentane

2 Les esters

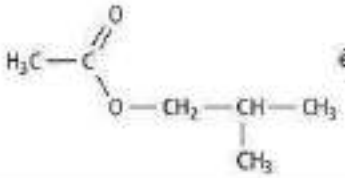
Formule $C_nH_{2n+1}-C(=O)-O-C_nH_{2n+1}$ ou $R-C(=O)-O-R'$

1. Rechercher le nom de l'alcane ayant pour chaîne carbonée celle contenant le groupe ester. 
2. Remplacer le -e final par la **terminaison *oate de***.
3. Faire suivre cette terminaison par le nom du groupe ***alkyle*** lié à l'oxygène.

EXEMPLES



méthanoate de propyle



éthanoate de 2-méthylpropyle

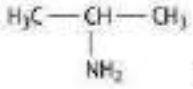
3 Les amines

Formule $C_nH_{2n+1}-N(C_nH_{2n+1})(C_nH_{2n+1})$ ou $R-N(R'')(R')$

1. Les plus simples contiennent le groupe NH_2.
Rechercher alors le nom de l'alcane de même chaîne principale.
2. Remplacer le -e final par la terminaison ***amine***.
3. Faire éventuellement précéder cette terminaison de l'indice de position du groupe NH_2.
Cet indice doit être le plus petit possible.

EXEMPLES

H_3C-NH_2 méthanamine

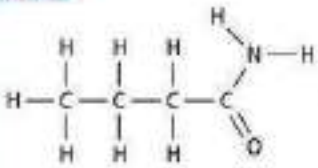


propan-2-amine

4 Les amides

Formule $C_nH_{2n+1}-C(=O)-N(C_nH_{2n+1})(C_nH_{2n+1})$ ou $R-C(=O)-N(R'')(R')$

EXEMPLE



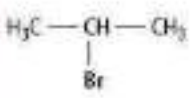
butanamide

1. Les plus simples contiennent le groupe NH_2.
Rechercher alors le nom de l'acide carboxylique de même chaîne principale.
2. Supprimer le mot ***acide*** et remplacer la terminaison ***oïque*** par la terminaison ***amide***.

5 Les halogénoalcanes

Formule $C_nH_{2n+1}-X$ ou $R-X$ avec X = Br, F, Cl ou I

EXEMPLES



2-bromopropane



trichlorométhane

1. Rechercher le nom de l'alcane de même **chaîne principale**.
2. Le faire précéder du nom du groupe ***halogéno*** (bromo pour Br, fluoro pour F, chloro pour Cl, iodo pour I).
3. Préciser éventuellement l'indice de position du groupe halogéno. Cet indice doit être le plus petit possible.
4. Lorsque le même groupe halogéno apparaît plusieurs fois, on lui ajoute un préfixe multiplicatif.

FICHE MÉTHODE 16

Construire une représentation graphique

Un **graphique** est la représentation des variations d'une grandeur en fonction d'une autre grandeur. Il permet ainsi de mieux appréhender un phénomène.

Des couples de valeurs sont généralement trouvés expérimentalement, et sont consignés dans un tableau.

EXEMPLE

On étudie l'évolution de la valeur de la tension aux bornes d'une lampe, en fonction de la valeur de l'intensité du courant électrique qui la traverse. On a relevé expérimentalement les points de fonctionnement du dipôle :

U (en V)	0	0,1	0,4	0,8	1,3	1,9	2,6	3,5	4,6	5,7
I (en mA)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90

1 Tracer et nommer les axes

- Tracer deux axes perpendiculaires sur une feuille (de préférence de papier millimétré), en utilisant un crayon à papier et une règle.
- Nommer chaque axe avec le nom de la grandeur (ou son symbole), et son unité. La grandeur qui est représentée en ordonnées, sur l'axe vertical, est celle dont on veut étudier l'évolution.

EXEMPLE

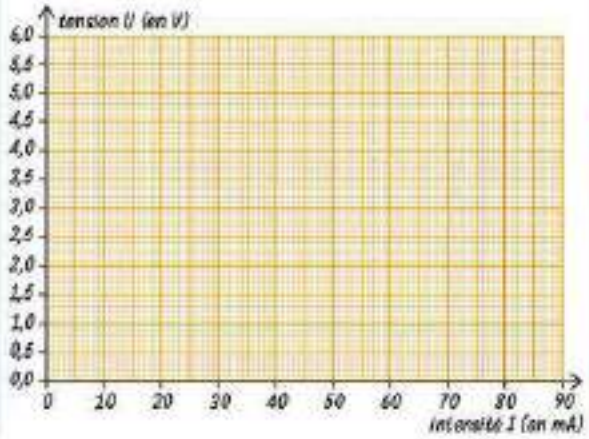
On trace un axe vertical pour la tension U (en V) et un axe horizontal pour l'intensité I (en mA).

2 Graduer les axes

- Graduer les axes, soit en utilisant l'échelle donnée, soit en choisissant une échelle adaptée. Celle-ci doit permettre d'obtenir un graphique suffisamment grand.

EXEMPLE

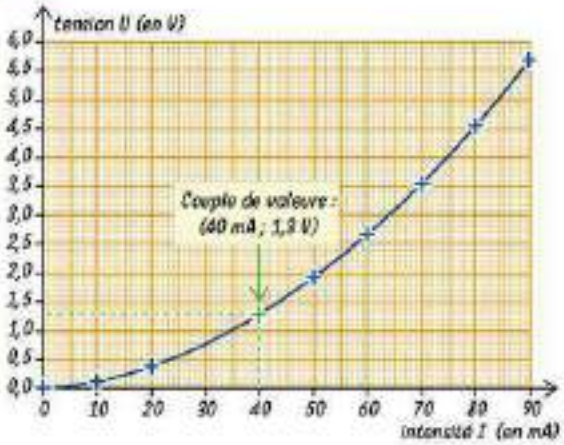
Ici, on peut prendre 1 cm pour 1,0 V en ordonnée, et 1 cm pour 10 mA en abscisse.



3 Placer les points et tracer la courbe

- Au crayon à papier, placer les couples de valeurs du tableau à l'aide de croix « + ».
- Si les points semblent alignés, les relier par une droite tracée à la règle : elle doit passer au plus près de ces points. Si les points ne sont pas alignés, les relier « à main levée ».

EXEMPLE



4 Donner un titre au graphique

- Donner un titre au graphique en utilisant une formulation du type : **« évolution de... en fonction de... »**. Le premier terme correspond au nom de la grandeur représentée en ordonnée, et le second celui de la grandeur en abscisse.

EXEMPLE

« Évolution de la valeur de la tension aux bornes d'une lampe en fonction de la valeur de l'intensité du courant électrique. »

FICHE MÉTHODE 17

Représenter un vecteur vitesse

Pour décrire le mouvement d'un objet, il faut connaître sa trajectoire ainsi que l'évolution de sa vitesse.

1 Vecteur déplacement et vecteur vitesse moyenne

Soient M et M', deux positions successives d'un point modélisant un système d'étude à des instants voisins séparés d'une durée Δt.

- Le **vecteur déplacement** est le vecteur :

$$\overrightarrow{MM'}$$



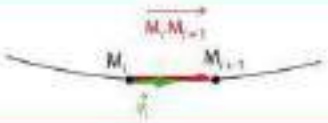
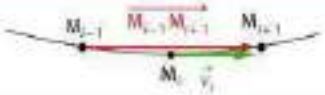
- Le **vecteur vitesse moyenne** de ce point s'écrit à partir du vecteur déplacement :

$$\vec{v} = \frac{\overrightarrow{MM'}}{\Delta t}$$



2 Vecteur vitesse en un point

Deux méthodes permettent de représenter le vecteur vitesse en un point modélisant un système d'étude.

Méthode n° 1 À partir du vecteur déplacement d'un point au point suivant	**Méthode n° 2** Par encadrement d'un point par deux points proches
M_i et M_{i+1} sont deux positions successives d'un point à des instants voisins séparés d'une durée Δt.	M_{i-1}, M_i et M_{i+1} sont des positions successives d'un point à des instants voisins séparés d'une durée Δt. M_{i-1} et M_{n-1} encadrent la position M_i et sont séparés d'une durée $2\Delta t$.
$\vec{v}_i = \frac{\overrightarrow{M_iM_{i+1}}}{\Delta t}$	$\vec{v}_i = \frac{\overrightarrow{M_{i-1}M_{i+1}}}{2\Delta t}$
	

3 Représentation à l'échelle

Quelle que soit la méthode utilisée, le vecteur vitesse a **une longueur proportionnelle à la valeur de la vitesse**. Il est donc représenté à l'aide d'une échelle de longueur qui lui est propre, et qu'il convient de choisir afin qu'elle soit adaptée.



échelle : 1 cm ⟶ 2 m·s^{-1}
$v = 4 \times 2 = 8$ m·s^{-1}

FICHE MÉTHODE 18

Représenter un vecteur accélération

1 Caractéristique du vecteur accélération

EXEMPLE

Caractéristique du vecteur accélération $\vec{a}_5$.

Le vecteur accélération $\vec{a}_5$ possède comme :

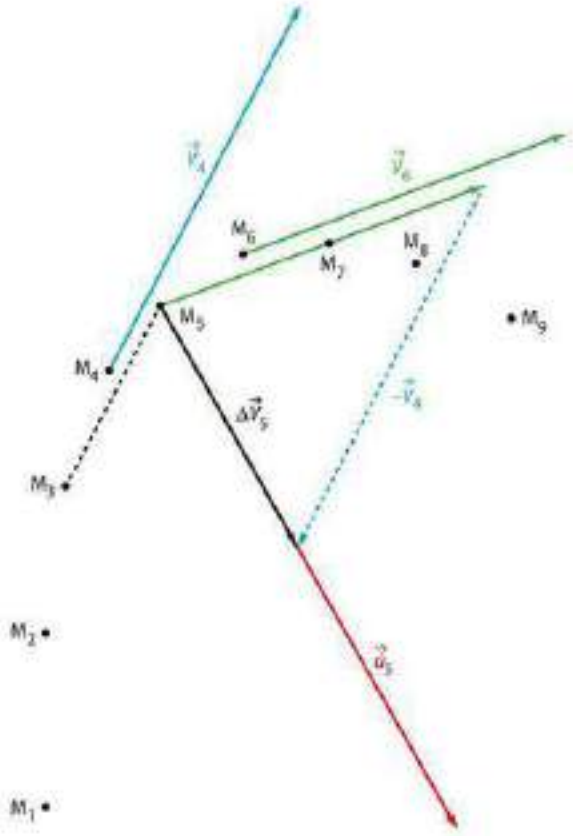
- **direction** : celle de $\Delta\vec{V}_5$;
- **sens** : celui de $\Delta\vec{V}_5$;
- **valeur** : $a_5 = \Delta V_5 / 2\,\Delta t$

Δt est l'intervalle de temps contant entre deux points consécutifs
a_5 s'exprime en $m \cdot s^{-2}$
la longueur du vecteur se base sur une échelle choisie pour les accélérations

2 Construction du vecteur accélération

EXEMPLE

Construction du vecteur accélération $\vec{a}_5$.



FICHE MÉTHODE 19

Additionner des vecteurs/des forces

Une force, qui modélise une action mécanique, est représentée par un vecteur.

1 Caractéristiques et notations

Un **vecteur** est un segment orienté (une flèche), ayant pour extrémités un point de départ et un point d'arrivée. Il est caractérisé par une **direction**, un **sens** et une **norme**.



2 Vecteurs opposés

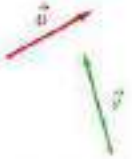
Deux vecteurs sont **opposés** s'ils ont la même direction, la même norme, et un sens opposé.

$\vec{u} = -\vec{v}$ ou $\vec{u} + \vec{v} = \vec{0}$

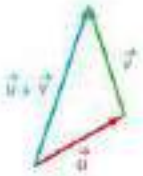


3 Addition de deux vecteurs

On doit additionner $\vec{u}$ et $\vec{v}$.



a. Méthode des triangles



Placer l'origine de $\vec{v}$ au niveau de la flèche de $\vec{u}$ puis relier l'origine de $\vec{u}$ à la flèche de $\vec{v}$ pour obtenir la somme.

b. Conséquences



Si trois vecteurs mis bout à bout forment une boucle, on peut dire que :

$\vec{u} + \vec{v} + \vec{w} = \vec{0}$

4 Cas des vecteurs forces

a. Un exemple de force

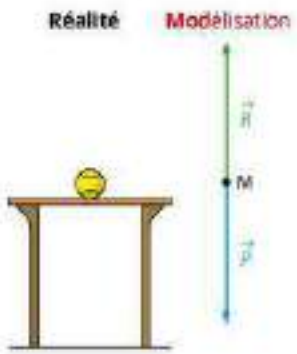
Une balle de masse m qui chute est soumise à l'action de la Terre modélisée par son **poids** $\vec{P}$ caractérisé par :
- sa direction : la verticale ;
- son sens : vers le bas ;
- sa norme : $P = m \cdot g$,

avec g l'intensité de pesanteur.



b. Équilibre

Une balle posée sur une table est à l'**équilibre** : le poids $\vec{P}$ qui modélise l'action de la Terre sur la balle et la force $\vec{R}$ qui modélise l'action de la table sur la balle sont représentés par des **vecteurs opposés**.
On dit que les forces se **compensent** : $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$.

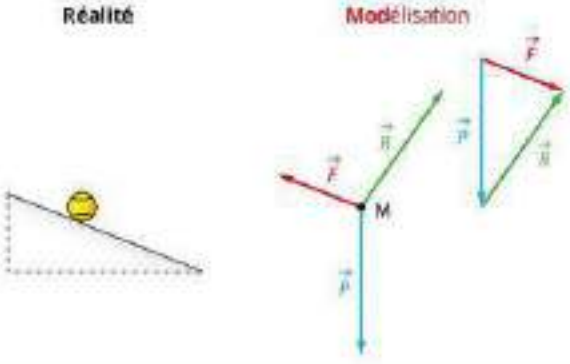


c. Forces qui se compensent

Une balle à l'équilibre sur un plan incliné est soumise à trois actions mécaniques :
- l'action de la Terre, modélisée par le poids $\vec{P}$;
- l'action de la table, modélisée par la force $\vec{R}$;
- les frottements, modélisés par la force $\vec{F}$.

La balle est à l'équilibre, donc $\vec{P} + \vec{F} + \vec{R} = \vec{0}$, et $\vec{P} + \vec{R} = -\vec{F}$.

Pour déterminer $\vec{F}$, on utilise la **méthode des triangles** :



FICHE MÉTHODE 20

Utilisation de phyphox pour mesurer une vitesse par effet Doppler

1 Télécharger l'application Phyphox, puis l'ouvrir à l'écran de votre smartphone

Dans un premier temps, **sélectionner le menu « Autocorrélation Audio »**.

Cette fonction vous permettra d'obtenir la fréquence du son lorsque l'émetteur sonore est immobile. Noter la valeur de cette fréquence, notée f_0.



2 Lancer le menu « Effet Doppler »

Icone d'aide, de description des paramètres de l'expérience, d'exportation des données.



Entrer ici la valeur de la fréquence f_0 obtenue lorsque l'émetteur est immobile

Estimer ici la valeur de la variation maximale du décalage Doppler Δf.

Pas de l'échantillonnage : il faut veiller à ce que la plage de fréquence soit nettement inférieure à l'inverse du pas en temps.

Un facteur $\frac{1}{10}$ est conseillé.

Pour déterminer la vitesse d'un mobile, on peut soit :
- travailler directement avec l'émetteur en mouvement ;
- lire un enregistrement audio d'un émetteur en mouvement.

3 Lancer la mesure avec l'icone

On peut recommencer l'acquisition en effaçant les données avec l'icone .

Les résultats s'affichent sous forme d'un graphique, on peut soit conserver les données en fréquences et utiliser le décalage Doppler pour calculer la vitesse ou bien obtenir directement la vitesse sur un autre graphique. Le smartphone étant particulièrement sensible, il est préférable de diminuer l'échelle, en utilisant le zoom, pour obtenir un résultat « lissé ».

L'icone permet de pointer une valeur.

L'icone permet de déplacer, agrandir ou réduire le graphique en faisant glisser ses deux doigts.

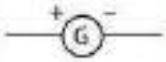
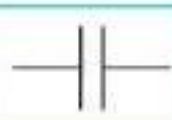
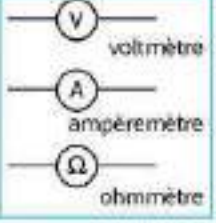


Grâce à cette icone , on peut exporter ses mesures au format CSV ou Excel, pour déterminer la moyenne de la vitesse, par exemple, en supprimant les valeurs aberrantes.

FICHE MÉTHODE 21

Schématiser les principaux dipôles électriques

1 Connaître les symboles normalisés

Catégorie de dipôle	Nom	Symbole normalisé
Générateurs	générateur 	
	pile 	
	cellule photovoltaïque 	
Récepteurs	lampe 	
	moteur 	
	diode 	
	diode électroluminescente (DEL) 	
	résistance 	
	condensateur 	
Multimètre		 voltmètre, ampèremètre, ohmmètre

2 Dessiner un schéma électrique

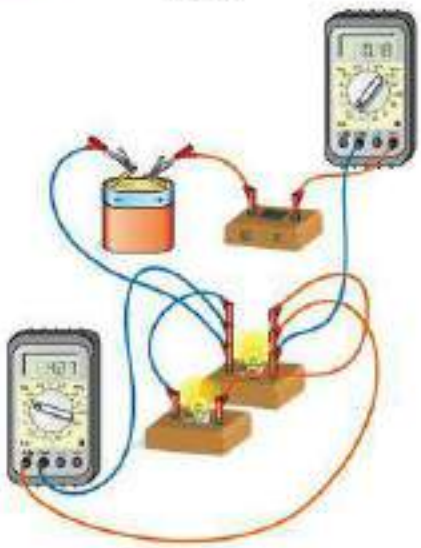
Afin de schématiser un circuit électrique, il est nécessaire de respecter des conventions de tracé :

- chaque maille du circuit est représentée par un rectangle ;
- chaque dipôle de la maille est ensuite représenté sur le rectangle en assurant une répartition équilibrée ;
- les nœuds du circuit doivent apparaître sur le schéma.

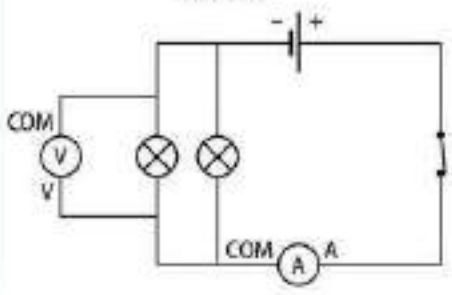
Remarque : plusieurs schémas peuvent correspondre à un même montage, car les positions des dipôles sur une maille peuvent varier.

EXEMPLE

Réalité



Schéma



FICHE PRATIQUE 1

La sécurité au laboratoire

1 Se préparer à l'activité expérimentale

J'attends les indications du professeur
avant de toucher au matériel. Le matériel et les produits peuvent être fragiles ou dangereux.

Je protège les affaires.
Les affaires personnelles inutiles comme les blousons sont éloignées.



Je fais de la place.
Je travaille sur une paillasse bien dégagée. Je range les sacs dessous pour ne pas gêner la circulation.

Je me protège.
Les cheveux longs sont attachés, les chaussures sont bien fermées. Je porte une blouse fermée en coton si le professeur l'estime nécessaire.

ANIMATION
Pictogrammes de sécurité en chimie

2 Les pictogrammes de sécurité à respecter

Les 9 pictogrammes de sécurité en chimie permettent de connaître les risques des produits.



Corrosif
Peut provoquer brûlures de la peau et lésions oculaires



Nocif ou irritant
au contact de la peau, par ingestion ou inhalation



Toxique
au contact de la peau, par ingestion ou inhalation



Danger pour la santé
(cancérogène, mutagène...)



Inflammable



Comburant
Peut provoquer ou aggraver un incendie



Gaz sous pression
Peut exploser et provoquer des brûlures



Explosif



Dangereux pour l'environnement

Il existe aussi des pictogrammes en physique



Attention ! Laser
Une exposition directe peut entraîner des lésions de la rétine

3 Pendant l'activité expérimentale

Je reste calme et attentif aux éventuelles indications données par le professeur.

Je porte les lunettes et/ou les gants de protection distribués par le professeur chaque fois que cela est nécessaire.



Je respecte le matériel.
Je manipule calmement et proprement.

Je signale tout incident ou difficulté au professeur.

Je manipule debout.
Je me déplace avec précaution.

CE QUE JE NE DOIS SURTOUT PAS FAIRE :



Gaspiller inutilement les produits mis à disposition.



Goûter les produits (certains sont toxiques).



Sentir les produits (certains sont toxiques par inhalation).



Aspirer un liquide à la bouche (certains sont toxiques).



Diriger un tube à essais que l'on chauffe vers quelqu'un.



Agiter les tubes à essais en les bouchant avec les doigts.

4 À la fin de l'activité expérimentale

- Je jette les produits usagés dans les récipients adaptés.
- J'éteins les appareils électriques.
- Je range ma paillasse et le matériel utilisé.
- Si j'ai utilisé de la verrerie, je fais la vaisselle en évitant toute projection.
- Je nettoie la paillasse.
- Je me lave les mains.

FICHE PRATIQUE 2

Utiliser un langage de programmation

À l'aide d'un programme informatique, on peut traiter des données d'expérience, automatiser des calculs... Tout algorithme doit être rédigé dans un langage de programmation adapté, puis compilé pour être exécuté par l'ordinateur.

Python est un langage de programmation à la syntaxe simple. Il est multiplateforme (Windows, MacOS, Linux, Android, IOS). Le langage Python peut ainsi être utilisé sur n'importe quel ordinateur, smartphone et même sur les calculatrices Casio Graph 90+E, TI 83 Premium CE et Numworks. Les programmes présents dans ce manuel sont compatibles avec la version 3 de Python. Pour un usage scientifique, on choisira l'environnement de développement PyScripter, intégré à la distribution « EduPython ».

1 Exécuter des commandes dans la console

La console Python permet d'exécuter de simples lignes de commandes ou bien de lancer des programmes. La console est utile pour tester des commandes avant de les insérer dans un programme.

Toute commande écrite après le signe >>> peut être directement exécutée en appuyant sur la touche « entrée » du clavier.





Voici trois astuces pratiques :

- L'**autocomplétion** : écrire la ou les premières lettres d'une commande. Un menu déroulant s'ouvre, proposant une liste des fonctions Python.
- L'**aide** : pour obtenir des détails sur une fonction, il suffit de se déplacer dans le menu déroulant.
- Les **couleurs de syntaxe** : dans la console et dans l'éditeur, des couleurs clarifient automatiquement la syntaxe des commandes. Par exemple, selon les réglages du logiciel, les chaînes de caractères s'afficheront en vert, les boucles `if` et `while` en bleu, les chiffres en rouge... Des erreurs de syntaxe sont donc visibles.

2 Manipuler les variables en Python

- Les variables ont un **type**, qui définit leurs propriétés et conditionne les fonctions que l'on peut leur appliquer. Voici quelques exemples de types en Python :

```
a = 5
b = 4.56
c = "Bonjour"
d = ["A","B","C",a,b,"Azerty"]
e = True
```

- **Entier** : entiers compris entre – 2 147 483 648 et 2 147 483 647.
- **Virgule flottante** : nombres réels, spécifiés avec un point, jusqu'à 12 chiffres significatifs.
- **Chaîne de caractères** : suite de caractères alphanumériques, spéciaux, accentués, etc.
- **Liste** : un ensemble contenant autant d'éléments voulus, de n'importe quel type.
- **Booléen** : variable prenant deux états seulement : Vrai (True) et Faux (False).

- Les mêmes opérations auront des effets différents selon le type de variable auquel elles sont appliquées.

EXEMPLE

L'opérateur « + », appliqué à des entiers, correspond à une addition. Le même opérateur, appliqué à des chaînes de caractères ou des listes, effectue leur concaténation, c'est-à-dire leur mise bout à bout.



addition



concaténation

3 Éditer un programme

- Cliquer dans la fenêtre d'édition pour écrire un programme.
- Saisir les commandes, ligne par ligne. Une fois le programme écrit, le nommer et l'enregistrer sous forme de fichier .py.
- Appuyer sur les touches « ctrl » + « F9 » pour compiler le programme et l'exécuter dans la console.
- En cas d'erreur, la console renvoie un message. La ligne du programme concernée par le « bug » est indiquée.



- **Structure d'un programme Python**

En Python, **l'indentation** (décalage du début de la ligne avec la touche « tabulation ») indique la structure des sous-programmes. En cas d'erreur d'indentation, le programme ne fonctionnera pas ou renverra des résultats erronés !

Les lignes précédées par # ne sont pas compilées.

EXEMPLE

```
#Début du programme
compteur = 10
while compteur > 0 :
    if compteur == 0 :
        print("C'est presque la fin")
    elif compteur == 1 :
        print("Dernier tour")
    else :
        print("On n'est pas encore arrivé")
    compteur = compteur - 1
print("C'est fini !")
```

Toutes ces lignes sont dans la boucle while.

Dans ce programme, la boucle if sera reprise 10 fois (compteur = 10, 9, 8, ... 0) alors que la ligne print("C'est fini !") ne sera exécutée qu'une seule fois.

Les **arguments** des fonctions (variables) sont écrits entre parenthèses.

4 Pour aller plus loin

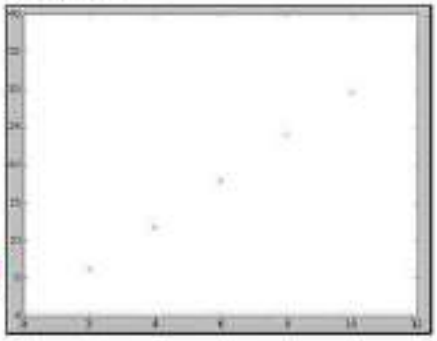
L'interpréteur Python sait faire des calculs simples, mais il est parfois nécessaire d'ajouter des fonctionnalités supplémentaires en important une **bibliothèque**.

En physique-chimie, on utilisera principalement les bibliothèques **math** pour manipuler des fonctions mathématiques usuelles ; **numpy** pour gérer des vecteurs ; **scipy** pour effectuer des calculs plus élaborés comme des régressions linéaires ; et **matplotlib** pour tracer des graphiques.

EXEMPLE

On lance la commande `from matplotlib.pyplot import *` pour pouvoir appeler ensuite toutes les fonctions du module **pyplot** de la bibliothèque **matplotlib**.

```
from matplotlib.pyplot import *
x = [0,2,4,6,8,10,12]
y = [0,4,2,12,9,16,24,20,28,36]
plot(x,y,'+')
show()
```



Pour créer une fonction, on utilise le mot clé « def » suivi du nom de la fonction et des parenthèses contenant les paramètres éventuels. Le mot clé « return » permet de renvoyer le résultat du calcul. Il suffira ensuite d'appeler la fonction dans la console pour afficher le résultat.

EXEMPLE

On crée une fonction angle_refraction qui prend comme arguments l'angle d'incidence d'un rayon, en radian, et les indices optiques des deux milieux :

```
from math import *
def angle_refraction(i,n1,n2):
    return asin(n1*sin(i)/n2)
```

FICHE PRATIQUE 3

Utiliser un microcontrôleur

Grâce à des microcontrôleurs, on réalise des dispositifs technologiques capables d'interagir avec leur environnement.

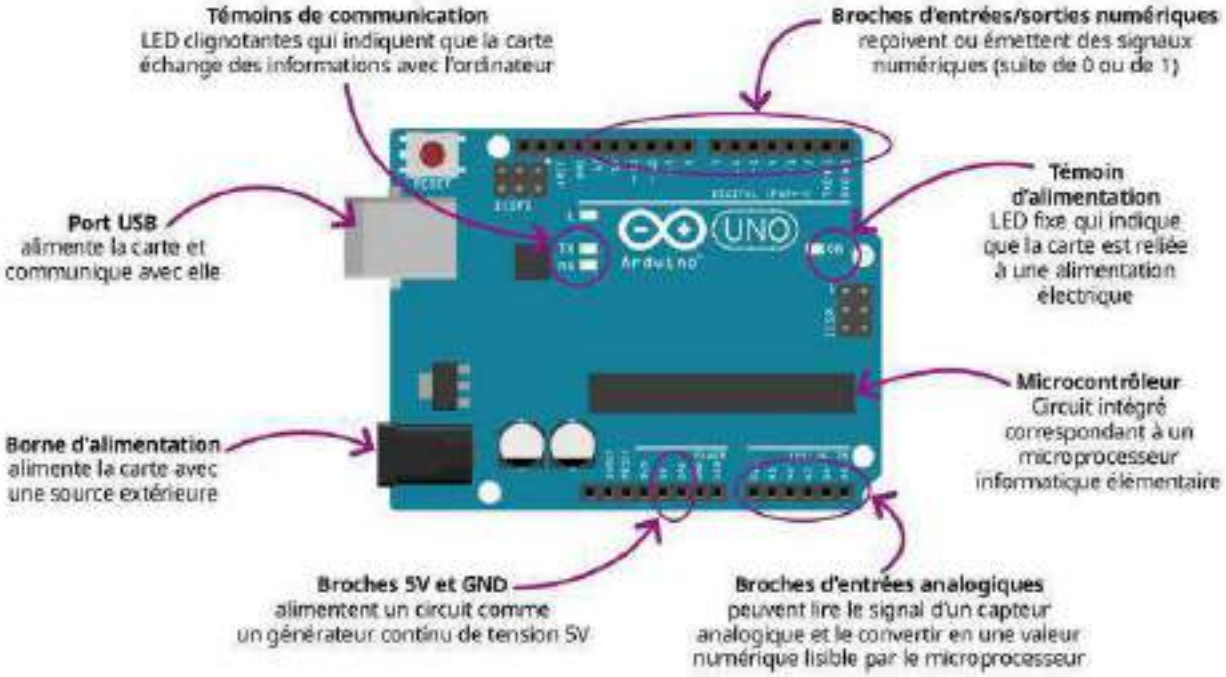


La carte Arduino Uno tient dans la main. Cet ordinateur simplifié est construit sur un circuit intégré unique contenant un **processeur**, une **mémoire** et des **périphériques programmables** d'entrée et de sortie.

Ce type de microcontrôleur est capable de recueillir des informations à l'aide de capteurs, puis de les exploiter pour effectuer des actions. L'ensemble suit les commandes indiquées par l'utilisateur sous la forme de programmes écrits en langage informatique.

1 S'approprier la carte Arduino

Les principaux éléments suivants sont présents sur la carte Arduino Uno :



L'utilisation d'une carte à microcontrôleur nécessite systématiquement la réalisation de trois opérations successives :

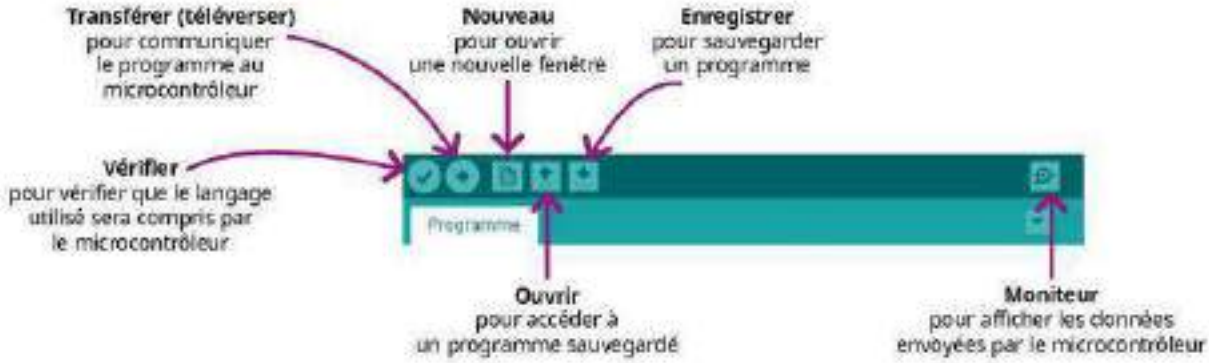
- connecter l'ordinateur à la carte, via un port USB, pour y transférer le programme qui donnera au microcontrôleur les instructions à suivre ;
- sur l'ordinateur disposant d'un logiciel adapté, écrire le programme en respectant le langage du microcontrôleur ;
- réaliser les circuits comportant les capteurs (photorésistance, thermistance, etc.) et les actionneurs (LED, moteur, haut-parleur, etc.).

2 Communiquer avec la carte Arduino

Afin de communiquer avec la carte Arduino, il convient d'utiliser le langage qu'elle est capable de comprendre en écrivant un ensemble d'instructions appelé **programme.**

Pour cela, ouvrir la **console Arduino** en cliquant sur l'icône :

Cette console comporte six icônes qui suffisent à communiquer avec le microcontrôleur :



Un programme Arduino comprend a minima deux parties :

- la **partie d'initialisation** dans laquelle tous les éléments qui vont jouer un rôle dans le programme sont définis ;
- la **partie de commande** qui va se réaliser de façon répétée.

Dans un programme, le texte précédé de // est un commentaire qui ne sera pas lu par le microcontrôleur.



3 Écrire un premier programme

On exécute un programme simple, appelé Blink, pour vérifier que la communication entre l'ordinateur et la carte Arduino fonctionne.

Dans la partie d'initialisation, on indique au microcontrôleur que la LED (notée L sur la carte) va devoir agir en suivant une commande.

Dans la partie de commande, on demande successivement :

- à la LED de s'allumer ;
- d'attendre 1 000 ms, soit 1 seconde ;
- à la LED de s'éteindre ;
- d'attendre 1 000 ms avant de répéter le cycle.

La diode L clignote ainsi toutes les secondes.

En modifiant la valeur de `delay (1000)`, on ajuste la période de ce clignotement.

```
// Partie d'initialisation
void setup() {
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
}

// Partie de commande
void loop() {
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
  delay(1000);
  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
  delay(1000);
}
```

FICHE PRATIQUE 4

Utiliser un tableur-grapheur

Un tableur-grapheur est un logiciel qui permet de classer des données dans des tableaux, d'effectuer des calculs à partir de ces données, et de créer des graphiques.

1 Utiliser le tableur

a. Entrer des données

• Ouvrir un logiciel de tableur tel que Microsoft Excel ou LibreOffice Calc.

Une **feuille de calcul** s'affiche : il s'agit d'un tableau, constitué de **lignes** numérotées et de **colonnes** repérées par des lettres.

Chaque case, appelée **cellule**, est repérée par ses coordonnées.



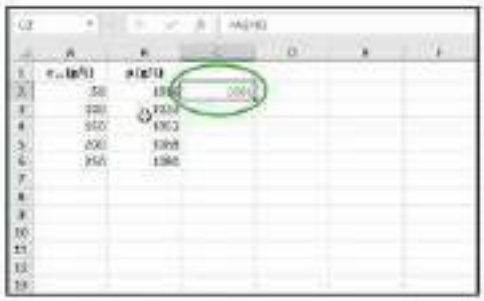
EXEMPLE

On saisit des couples de mesure dans les colonnes A et B : en colonne A les concentrations en masse de solutions étalons en g · L^{-1}, et en colonne B la masse volumique mesurée en g · L^{-1}.

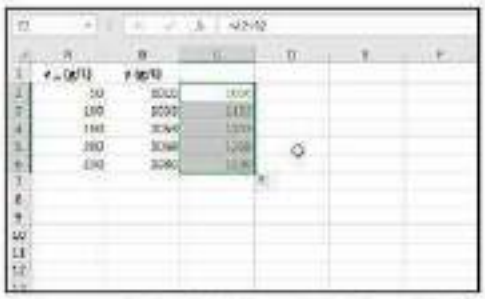
b. Faire des calculs

• Pour effectuer des calculs, on entre une formule dans une nouvelle cellule en commençant par le signe =, puis on valide par la touche Entrée.

Les opérations courantes s'effectuent avec les **opérateurs** + (somme) ; - (différence) ; * (produit) ; / (quotient) et ^ (puissance).



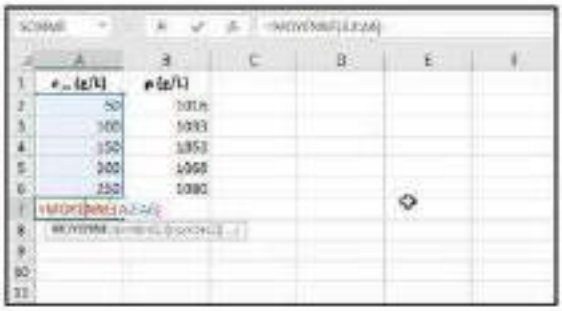
La cellule C2 est la somme des cellules A2 et B2.

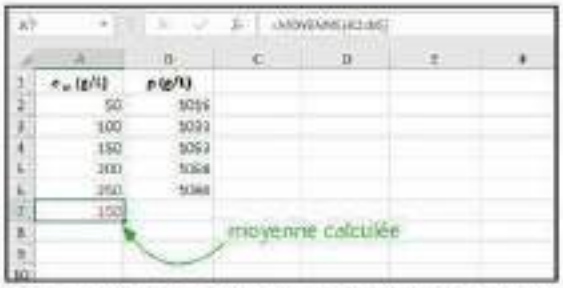


En tirant sur le bord inférieur droit de la cellule C2, on duplique la formule dans toute la colonne C.

• Les tableurs-grapheurs font également appel à des **bibliothèques de fonctions** où les principales fonctions mathématiques (sinus, cosinus, somme, moyenne, écart-type) sont disponibles.

Ces fonctions peuvent s'appliquer à une cellule ou à un ensemble de cellules.





Dans la cellule A7, la séquence « =MOYENNE/ sélectionner A2 à A6/ valider » calcule la moyenne des cinq premières valeurs de la colonne A.

2 Utiliser le grapheur

a. Construire un graphique

• Avec la souris, sélectionner la plage de cellules contenant les données à représenter, puis cliquer sur le menu permettant d'insérer un graphique.



Avec Libre Office Calc



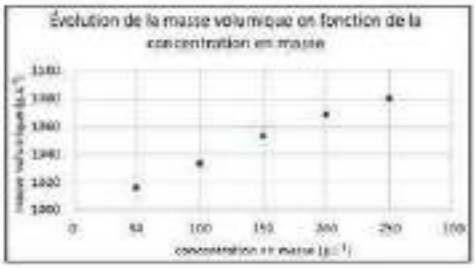
Avec Microsoft Excel

• Choisir le type de graphique souhaité : nuage de points, courbe, histogramme, secteur, etc. Vérifier les paramètres de tracé : choix de la série de données à représenter sur l'axe X et sur l'axe Y, format des séries de données (en ligne ou en colonne), etc.

• Compléter le graphique en ajoutant le nom des grandeurs portées sur chacun des axes, avec leur unité, et le titre.

EXEMPLE

Pour étudier l'évolution de la masse volumique de solutions en fonction de la concentration en masse de soluté, on trace un nuage de points avec la masse volumique en ordonnée, et la concentration en masse en abscisse.



b. Modéliser un ensemble de données

• Cliquer sur le menu permettant d'insérer une **courbe de tendance**.

• Choisir le type de courbe (par exemple linéaire) afin de modéliser les données, et demander l'affichage de son **équation**.
Le logiciel minimise automatiquement l'écart entre les données et le modèle de courbe choisi.

• Le **coefficient de détermination** R^2 apprécie l'adéquation entre les valeurs et le modèle choisi. Plus ce coefficient est proche de 1, meilleure est la correspondance entre les deux.



L'équation de la courbe de régression linéaire est donnée avec le coefficient de détermination.

Avec Libre Office Calc



Avec Microsoft Excel



EXEMPLE

L'évolution de la masse volumique en fonction de la concentration en masse de soluté se modélise par une droite. Son équation permet par exemple de calculer la concentration en masse, inconnue, d'une solution à partir de la mesure de sa masse volumique.

FICHE PRATIQUE 5

Utiliser sa calculatrice TI (83 Premium CE)



1 Exploiter une série de mesures

Pour effectuer des calculs à partir d'un ensemble de données, on les saisit dans des listes.

1 Entrer dans le mode Statistique en appuyant sur la touche stats, puis confirmer le choix 1 avec la touche entrer.



2 Saisir les données, par exemple dans la liste L_1, en appuyant sur la touche entrer après la saisie de chacune des valeurs.



3 Appuyer successivement sur les touches stats, ▸ et entrer, puis valider trois fois pour lancer les calculs sur les n valeurs de la liste L_1.



4 La calculatrice affiche les résultats obtenus :



2 Construire un graphe

On veut représenter graphiquement les valeurs entrées dans une liste L_2 en fonction de celles présentes dans L_1.

1 Appuyer sur les touches 2nde puis (f|x) pour accéder au menu graphique.



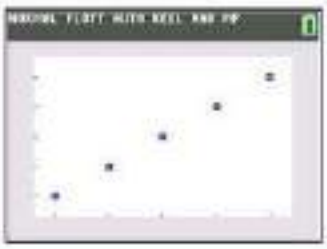
2 Appuyer sur la touche entrer, sélectionner le 1er graphe en allant sur **Aff** puis choisir un type de graphe. La liste **L1** doit être en abscisse (Xliste), et la liste **L2** en ordonnée (Yliste).



3 Pour ajuster la fenêtre d'affichage, presser la touche zoom. Puis choisir la commande « **9 : ZoomStat** » en descendant avec ▾ et valider avec la touche entrer.



4 Le graphe choisi s'affiche :



FICHE PRATIQUE 6

Utiliser sa calculatrice Casio (Graph 90+E)



1 Exploiter une série de mesures

Pour effectuer des calculs à partir d'un ensemble de données, on les saisit dans des listes.

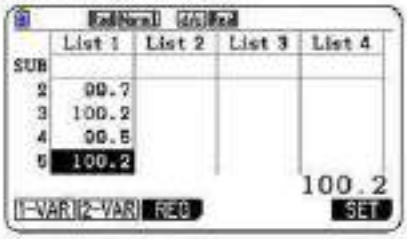
1 À l'aide du pavé directionnel, sélectionner le menu Statistique. Valider en appuyant sur la touche EXE.



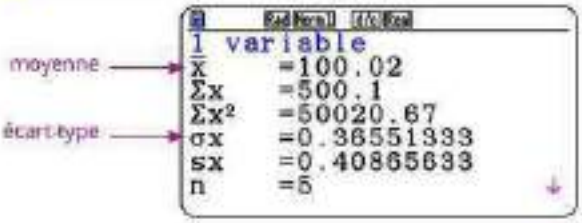
2 Saisir les données dans la liste **List 1**, en validant chaque valeur avec la touche EXE.



3 Pour lancer les calculs statistiques sur les *n* valeurs de la liste **List 1**, appuyer sur la touche pour sélectionner **CALC** et choisir ensuite le menu **1-VAR** avec la touche .



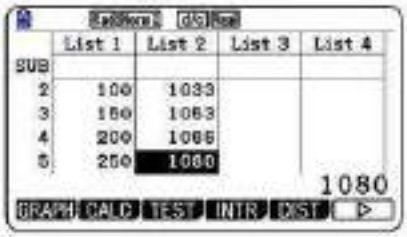
4 La calculatrice affiche les résultats :



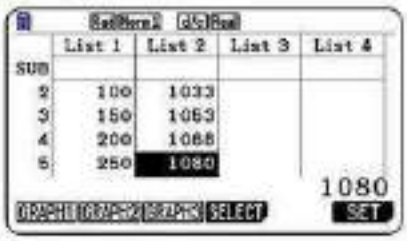
2 Construire un graphe

On veut représenter graphiquement les valeurs entrées dans « List 2 » en fonction de celles présentes dans « List 1 ».

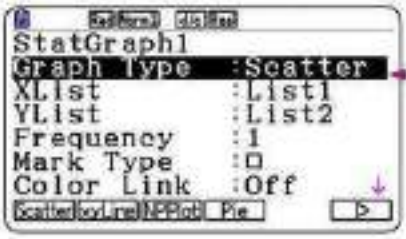
1 Presser la touche pour choisir **GRAPH**.



2 Presser la touche pour choisir **SET** et accéder aux paramètres du graphique.



3 Choisir **List 1** en abscisse (XList), **List 2** en ordonnée (YList). Dans **Graph Type**, sélectionner le type de graphe voulu (pour **Scatter**).



Nuage de points

4 Valider avec EXE puis appuyer sur la touche pour afficher le graphe.



FICHE PRATIQUE 7

Utiliser sa calculatrice Numworks



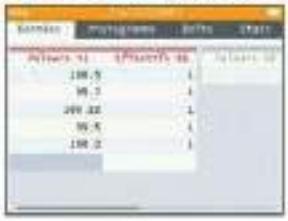
1 Exploiter une série de mesures

Pour effectuer des calculs à partir d'un ensemble de données, on les saisit dans des listes.

1. À l'aide du pavé directionnel, sélectionner l'application Statistiques. Valider en appuyant sur la touche EXE.



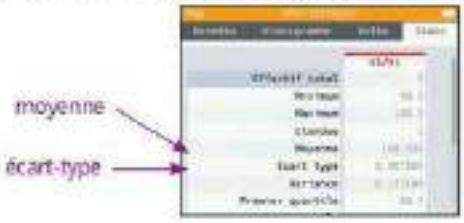
2. Saisir les données dans la liste **V1**, en validant chaque valeur avec la touche EXE.



3. Utiliser le pavé directionnel pour sélectionner **stats**.



4. Valider en appuyant sur la touche EXE et la calculatrice affiche les résultats :



2 Construire un graphe

On veut représenter graphiquement les valeurs **Y1** entrées en ordonnées en fonction de celles **X1** présentes en abscisse.

1. À l'aide du pavé directionnel, sélectionner l'application Régressions. Valider en appuyant sur la touche EXE.



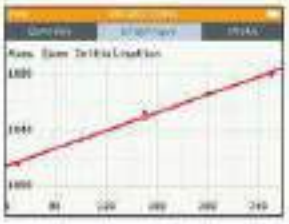
2. Saisir les données en abscisses **X1** et ordonnées **Y1**, en validant chaque valeur avec la touche EXE.



3. Utiliser le pavé directionnel pour sélectionner **Graphique**.



4. Valider avec la touche EXE et le graphe s'affiche :



FICHE PRATIQUE 8

Connaître la verrerie de laboratoire

1 Verrerie usuelle



Erlenmeyer



Ampoule à décanter



Ballon monocol



Fiole à vide et entonnoir Büchner

2 Verrerie volumétrique



Éprouvette graduée



Pipette jaugée



Fioles jaugées



Burette graduée

3 Verrerie spécialisée



Réfrigérant à eau



Réfrigérant à eau



Colonne de Vigreux

FICHE PRATIQUE 9

VIDÉO Réalisation d'une dissolution

Préparer une solution de concentration donnée par dissolution

1 Détermination de la masse de soluté à prélever



• Pour préparer un volume V **(en L)** de solution de *concentration en masse* de soluté c_m **(en g · L^{-1})**, il faut prélever une masse de soluté m **(en g)** :

$$m = c_m \cdot V$$

• Pour préparer un volume V **(en L)** de solution de *concentration en quantité de matière* de soluté c **(en mol · L^{-1})** dont la masse molaire est M **(en g · mol^{-1})**, il faut prélever une masse de soluté m **(en g)** :

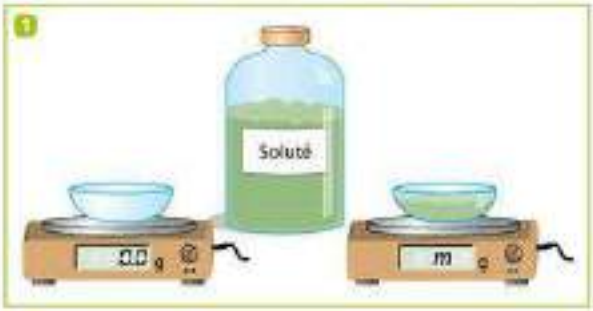
$$m = c \cdot V \cdot M$$

2 Matériel à utiliser

• Verrerie de contenance : **fiole jaugée de volume V** et son bouchon.

• *Matériel complémentaire* : balance ; coupelle et spatule ; entonnoir ; compte-gouttes.

3 Étapes de la préparation de la solution



• Poser une coupelle sur la balance.

• Effectuer la tare de la balance, puis peser l'échantillon de soluté de masse m.



• Adapter un entonnoir sur la fiole jaugée de volume V et verser le contenu de la coupelle dans la fiole.

• Prendre soin d'entraîner tout le solide en rinçant la coupelle et l'entonnoir avec un peu d'eau distillée.



• Ajouter de l'eau distillée dans la fiole en ne la remplissant qu'à moitié.

• Boucher la fiole et agiter doucement jusqu'à dissolution complète du solide.



• À la pissette, ajouter de l'eau distillée jusqu'à 1 cm au-dessous du trait de jauge.

• Compléter au compte-gouttes et ajuster le niveau au trait de jauge en alignant le bas du ménisque sur le trait de jauge.

• Boucher et agiter doucement pour homogénéiser : la solution est prête.

FICHE PRATIQUE 10

ANIMATION
Réalisation d'une dilution

Préparer une solution de concentration donnée par dilution

1 Détermination du volume de solution-mère à prélever

Pour préparer un volume V_1 (en L) de solution-fille de *concentration en masse* c_{m1} (en $g \cdot L^{-1}$), il faut prélever un échantillon de volume V_0 (en L) de solution-mère de *concentration en masse* c_{m0} (en $g \cdot L^{-1}$) de valeur :

$$V_0 = \frac{c_{m1} \cdot V_1}{c_{m0}}$$

Pour préparer un volume V_1 (en L) de solution-fille de *concentration en quantité de matière* c_1 (en $mol \cdot L^{-1}$), il faut prélever un échantillon de volume V_0 (en L) de solution-mère de *concentration en quantité de matière* c_0 (en $mol \cdot L^{-1}$) de valeur :

$$V_0 = \frac{c_1 \cdot V_1}{c_0}$$



2 Matériel à utiliser

- La verrerie de prélèvement est **une pipette jaugée de contenance V_0**.

La verrerie de contenance utilisée est une **fiole jaugée de volume V_1** et son bouchon.

- *Matériel complémentaire* : un système de pipetage (pipeteur ou propipette) ; un bécher pour prélever la solution-mère ; un compte-gouttes ou une pipette.

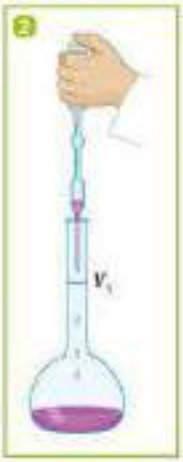
3 Étapes de la préparation de la solution



- Verser la solution à prélever dans un bécher.
- Rincer la pipette jaugée avec un peu de cette solution.
- À l'aide de la pipette jaugée et de la propipette (ou pipeteur), prélever le volume V_0 de solution-mère en alignant le bas du ménisque de la solution sur le trait de jauge.



- Ajouter de l'eau distillée dans la fiole en ne la remplissant qu'à moitié.
- Boucher la fiole et agiter doucement pour homogénéiser le mélange.



- Introduire le prélèvement dans une fiole jaugée de volume V_1.
- Ne pas souffler dans la pipette pour récupérer les dernières gouttes, leur volume n'est pas comptabilisé dans V_0 !



- À la pissette, ajouter de l'eau distillée jusqu'à 1 cm au-dessous du trait de jauge. Compléter au compte-gouttes et ajuster le niveau au trait de jauge en alignant le bas du ménisque sur le trait de jauge.
- Boucher et agiter doucement pour homogénéiser : la solution diluée (solution-fille) est prête.

FICHE PRATIQUE 11

Utiliser un pH-mètre

L'usage du pH-mètre nécessite un certain nombre de précautions, qu'il est important de respecter si l'on veut obtenir des résultats corrects.

1 Description



- Le pH-mètre est un millivoltmètre électronique qui mesure la tension électrique entre deux électrodes en général réunies (sonde pH-métrique).
- Il se compose d'une sonde pH-métrique et d'un boîtier de mesure.
- La tension électrique entre les deux électrodes est une fonction affine de la valeur du pH et elle dépend de la température.
- L'appareil affiche les résultats directement en unités de pH.

2 Précaution d'emploi des électrodes

- Manipuler la sonde avec précaution.
- La rincer soigneusement sous un jet de pissette d'eau distillée avant et après chaque mesure.
- Entre deux lectures, plonger la sonde dans de l'eau distillée mais ne pas la laisser dans la solution ni à l'air libre.
- Remettre la sonde dans la solution de conservation entre chaque période d'utilisation.

3 Étalonnage



- La valeur du pH dépend de la température des solutions : en général il est nécessaire de la mesurer et l'enregistrer dans l'appareil.
- L'étalonnage s'effectue à l'aide de deux solutions au pH connu appelées solutions tampon.
- Immerger la sonde dans une solution tampon (les valeurs courantes étant pH = 4, 7 ou 10) puis valider la valeur du pH.
- Rincer la sonde à l'eau distillée.
- Immerger la sonde dans une seconde solution tampon puis valider à nouveau la valeur du pH (avec certains modèles il y a un ordre à suivre quant à l'utilisation des deux solutions tampons).

4 Mesure

- Plonger la sonde en réglant sa hauteur pour qu'elle soit bien immergée.
- Attendre la stabilisation de l'affichage (certains modèles proposent un mode automatique qui interrompt la mesure lorsque la valeur est stable) avant de noter le résultat qui n'est donné qu'à 0,1 unité de pH près.

FICHE PRATIQUE 12

Utiliser un conductimètre

L'usage du conductimètre nécessite un certain nombre de précautions qu'il est important de respecter si l'on veut obtenir des résultats corrects.

1 Description

Un conductimètre du commerce mesure directement la conductivité σ (en $S \cdot m^{-1}$).
Il se compose d'une sonde conductimétrique et d'un boîtier de mesure.



2 Étalonnage

- Il doit être réalisé à l'aide d'une solution aqueuse étalon dont la conductivité est connue en fonction de la température, par exemple du chlorure de potassium (K^+ (aq), Cl^- (aq)).
- Rincer la sonde de mesure à l'eau distillée et l'essuyer à l'aide de papier absorbant.
- Plonger la sonde du conductimètre et un thermomètre dans la solution et agiter (un capteur de température peut aussi être intégré à la sonde).
- Attendre que l'équilibre thermique soit atteint et noter la température (automatique sur certains modèles).
- En tenant compte de la température de la solution, ajuster la valeur affichée de la conductivité à la valeur donnée dans les tables (ci-contre).

	Concentration de la solution étalon de chlorure de potassium (en $mol \cdot L^{-1}$)	
	$c = 1{,}0 \times 10^{-1}$	$c = 1{,}0 \times 10^{-2}$
Température (en °C)	**Conductivité σ** (en $mS \cdot cm^{-1}$)	**Conductivité σ** (en $\mu S \cdot cm^{-1}$)
20	11,700	1 279
21	11,960	1 305
22	12,220	1 331
23	12,470	1 359
24	12,730	1 387
25	12,970	1412

3 Mesures

- Si on dispose de différentes solutions, on effectue les mesures de conductivité de la solution la plus diluée à la plus concentrée.
- Toujours rincer à l'eau distillée et sécher avec du papier absorbant la sonde conductimétrique entre deux mesures.
- Plonger la sonde en réglant sa hauteur pour qu'elle soit bien immergée.
- Attendre la stabilisation de la valeur affichée.



FICHE PRATIQUE 13

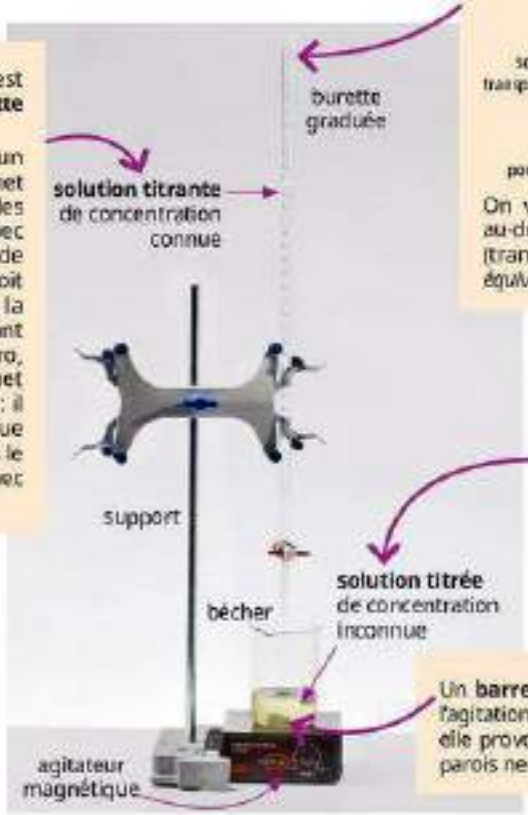
Réaliser un titrage direct

1 Qu'est-ce qu'un titrage direct ?

Titrer une espèce chimique en solution, c'est déterminer sa concentration en quantité de matière à l'aide d'une réaction chimique. Lors d'un titrage direct, l'espèce chimique à doser (l'espèce titrée) réagit avec une espèce chimique de concentration en quantité de matière connue (l'espèce titrante). La réaction mise en jeu doit être totale et rapide. Le titrage direct est une méthode destructive : l'espèce titrée est consommée.

2 Dispositif expérimental

La solution titrante est placée dans une **burette graduée**.
Après avoir mis un bécher sous le robinet de la burette, rincer les parois de la burette avec quelques millilitres de la solution qu'elle doit contenir. Remplir la burette en dépassant la graduation du zéro, puis ouvrir le robinet pour ajuster le zéro : il est indispensable que la partie située après le robinet soit remplie avec la solution à doser.





On veillera à lire la graduation au-dessus ou au-dessous du ménisque selon le type de solution (transparente ou opaque). *La lecture du volume équivalent se fera selon le même principe.*

La solution titrée doit être prélevée à l'aide d'une **pipette jaugée**.
Choisir une pipette jaugée correspondant au volume voulu et rincer ses parois avec la solution à prélever. Jeter la solution de rinçage, puis prélever le volume de solution et l'introduire dans un bécher propre et sec.

Un **barreau aimanté** est introduit dans le bécher et l'agitation magnétique doit être bien réglée. Trop rapide, elle provoque des éclaboussures et les gouttes sur les parois ne sont pas dosées.

3 Équivalence

Au cours d'un titrage, l'espèce titrante est versée progressivement. Tant qu'il reste de l'espèce titrée, celle-ci réagit avec l'espèce titrante versée. L'espèce titrante est donc entièrement consommée : c'est le réactif limitant. Quand il ne reste plus de l'espèce titrée en solution, le réactif titrant versé ne peut plus réagir et reste en solution. C'est alors le réactif titré qui est le réactif limitant.

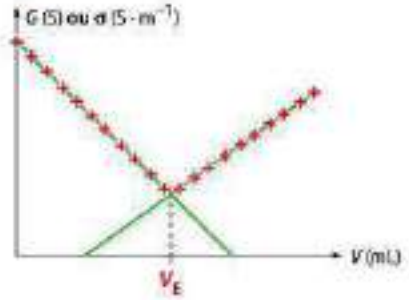
Il existe donc un certain volume de solution titrante versée pour lequel aucun des réactifs titrant et titré ne reste en solution : c'est le volume équivalent.

L'équivalence d'un titrage est l'état final du système chimique pour lequel les réactifs ont été introduits en proportions stœchiométriques. C'est aussi l'état du système pour lequel il y a changement de réactif limitant.

Lors d'un titrage colorimétrique, l'équivalence peut se repérer par disparition d'une coloration ou apparition d'une coloration persistante, phénomène appelé « virage ».

4 Titrage par conductimétrie

- La sonde conductimétrique doit être réglée en hauteur pour qu'elle soit bien immergée sans être frappée par le barreau aimanté, lors de l'agitation.
- Mesurer la conductance G ou la conductivité σ (FICHE PRATIQUE ➡ p. 573) en fonction du volume V de solution titrante versé.
- À partir des points expérimentaux, on trace une droite de régression avant l'équivalence, puis une seconde après l'équivalence. L'intersection de ces deux droites a pour abscisse le volume équivalent V_E.



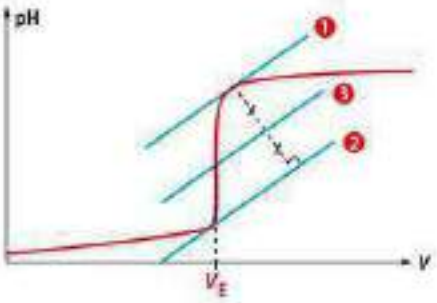


5 Titrage par pH-métrie

- La sonde pH-métrique doit être réglée en hauteur pour qu'elle soit bien immergée sans être frappée par le barreau aimanté, lors de l'agitation.
- Tracer la courbe représentant le pH mesuré (FICHE PRATIQUE ➡ p. 572) en fonction du volume V de solution titrante versé.
- L'équivalence est repérée par une variation brutale du pH sur la courbe. Deux méthodes permettent de la déterminer.

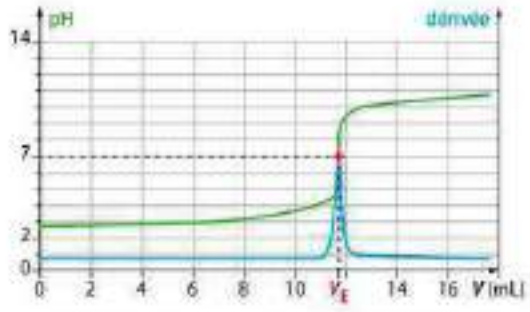
a. Méthode des tangentes

De part et d'autre de la zone de saut de pH, tracer deux tangentes à la courbe parallèles ❶ et ❷, puis une droite ❸ qui leur est parallèle et équidistante.
Cette droite coupe la courbe de titrage au point dont l'abscisse est le volume équivalent V_E.

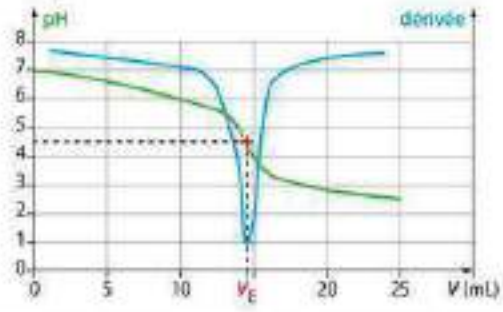


b. Méthode de la dérivée

À l'aide d'un logiciel, tracer la dérivée de la courbe pH = $f(V)$.
L'abscisse de l'extremum de cette courbe est le volume équivalent V_E.



L'extremum de la courbe dérivée est un maximum dans le cas du titrage d'un acide par une base.



L'extremum de la courbe dérivée est un minimum dans le cas du titrage d'une base par un acide.

FICHE PRATIQUE 14

Réaliser un dosage par étalonnage

Comment déterminer la concentration en quantité de matière d'une espèce chimique à partir d'un ensemble de solutions étalons de concentrations connues ?

1 Qu'est-ce qu'un dosage par étalonnage ?

Le dosage par étalonnage permet de déterminer la concentration en quantité de matière inconnue d'une espèce en solution sans que la nature ni la concentration de la solution analysée ne soient modifiées. Cette méthode est dite non destructive.

2 Préparation des solutions étalons



- Préparer un ensemble de solutions étalons contenant l'espèce chimique à doser et dont les concentrations en quantité de matière sont connues précisément. Si la solution est colorée, on réalise une échelle de teintes.
- Pour que la méthode soit fiable, il faut que les concentrations en quantité de matière des solutions étalons encadrent celles de la solution contenant l'espèce à doser.

3 Utilisation de la spectrophotométrie

a. Validité du dosage

- Les mesures sont toutes réalisées à la même longueur d'onde et à la même température.
- L'épaisseur de la solution traversée reste la même.
- La solution est suffisamment diluée (inférieure à 100 mmol · L^{-1}), homogène (pas de précipité) et elle ne réagit pas à la lumière.
- L'espèce chimique étudiée est la seule à absorber la radiation de longueur d'onde considérée.
- La loi de Beer-Lambert établit une proportionnalité entre l'absorbance et la concentration d'une solution :

coefficient de proportionnalité (en L · mol^{-1})

absorbance (sans unité) → $A = k \cdot c$ ← concentration en quantité de matière (en mol · L^{-1})

b. Réalisation de la courbe d'étalonnage



- Mesurer l'absorbance de chacune des solutions étalons préparées (FICHE PRATIQUE ➡ p. 578).
- Reporter les mesures sur un graphique représentant l'absorbance en fonction de la concentration en quantité de matière.
- Les points de mesure reportés sur le graphique doivent être alignés (aux incertitudes expérimentales près) suivant une droite passant par l'origine.

4 Utilisation de la conductimétrie

a. Validité du dosage

- les mesures sont toutes réalisées à la même température ;
- la solution est suffisamment diluée : concentrations en quantité de matière inférieures à 10^{-2} mol · L^{-1}.
- dans ce cas la conductivité de la solution est proportionnelle à sa concentration en quantité de matière de soluté apporté. La loi de Kohlrausch établit cette proportionnalité :

conductivité molaire ionique de l'ion i (en S · m^2 · mol^{-1})

(en S · m^{-1}) → $\sigma = \sum \lambda_i \cdot c_i$ ← concentration de l'ion (en mol · m^{-3})

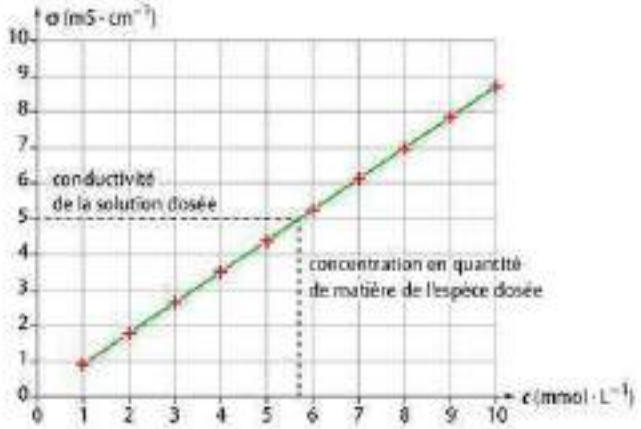
b. Réalisation de la courbe d'étalonnage

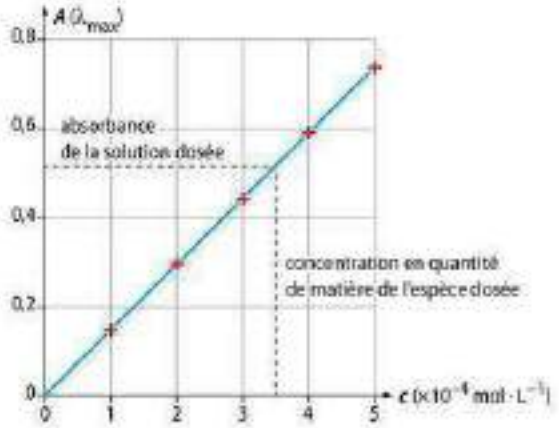
- Mesurer la conductivité de chacune des solutions étalons préparées (FICHE PRATIQUE ➡ p. 573).
- Reporter les mesures sur un graphique représentant la conductivité en fonction de la concentration en quantité de matière.
- Les points de mesure reportés sur le graphique doivent être alignés (aux incertitudes expérimentales près) suivant une droite passant par l'origine.



5 Détermination de la concentration inconnue

- Mesurer l'absorbance ou la conductivité de la solution à doser.
- Déduire de la courbe d'étalonnage la concentration en quantité de matière de l'espèce chimique dosée.





FICHE PRATIQUE 15

Réaliser un spectre d'absorption UV-visible

1 Absorbance d'une solution

À l'aide d'un spectrophotomètre, on détermine l'absorbance d'une solution, c'est-à-dire sa capacité à absorber les radiations lumineuses de différentes longueurs d'ondes qui la traversent.

Pour un faisceau monochromatique de longueur d'onde donnée, l'appareil compare l'intensité de la lumière incidente I_0 et l'intensité de la lumière transmise I et fournit une tension électrique qui varie comme l'absorbance A de la solution.



absorption du flux lumineux par la solution à analyser

2 Dispositif expérimental

Le spectrophotomètre comporte un émetteur et un récepteur de lumière entre lesquels on place une cuve contenant un peu de solution à analyser.



Étalonnage

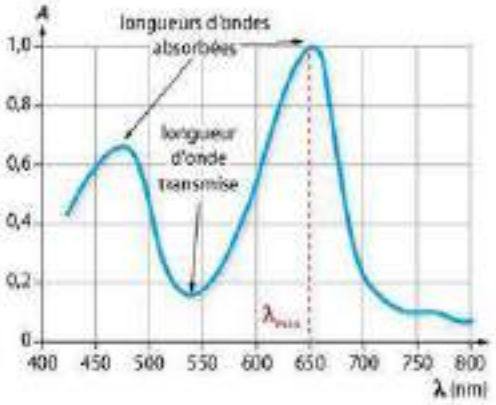
- Une mesure de référence (le « blanc ») doit être réalisée avec une cuve contenant le solvant (en général de l'eau distillée), afin que la variation de l'intensité lumineuse ne dépende que de l'espèce chimique étudiée.
- Attention à respecter la position des fenêtres de la cuve lors de l'insertion de l'échantillon dans son porte-cuve !

Mesure

- On introduit la cuve contenant l'échantillon à analyser dans le porte-cuve.
- Les valeurs de l'absorbance s'affichent directement sur l'appareil ou sont enregistrées par un dispositif d'acquisition de mesures et de traitement de données.

Spectre

- Ce graphique représente l'absorbance A de la solution en fonction de la longueur d'onde λ.



FICHE PRATIQUE 16

ANIMATION Chauffage à reflux

Réaliser une distillation ou un chauffage à reflux

1 Principe et intérêt des montages

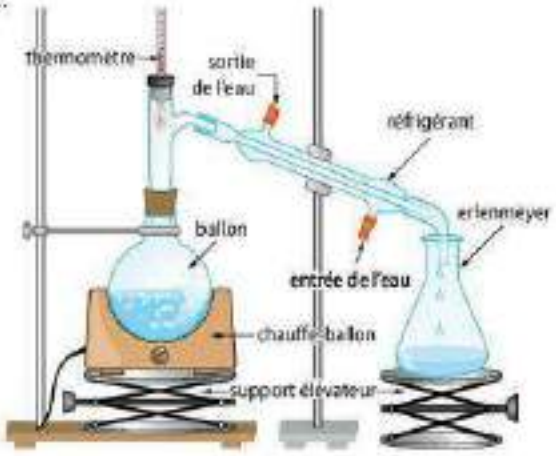
- Une **distillation** permet de séparer deux liquides miscibles dont les températures d'ébullition sont différentes. Lorsque le mélange est chauffé, le composé qui a la température d'ébullition la plus basse s'évapore le premier. Ses vapeurs se refroidissant dans le réfrigérant, elles se liquéfient : on peut alors recueillir ce liquide, séparé du reste du mélange.

- Un **chauffage à reflux** est utilisé pour augmenter la vitesse des transformations chimiques lors des synthèses.

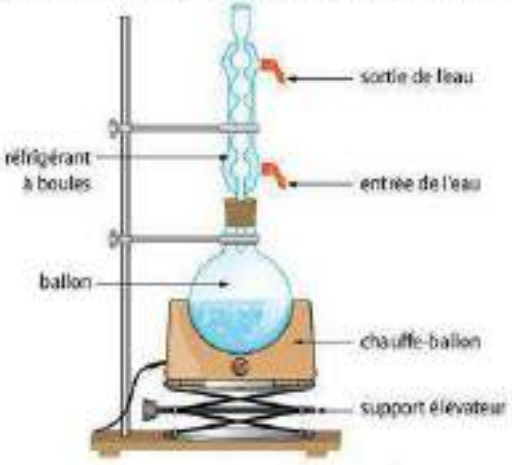
Le reflux permet d'éviter les pertes de matière en liquéfiant les vapeurs formées.

2 Mise en œuvre pratique des deux montages

- Introduire le mélange dans un ballon à fond rond et ajouter quelques grains de pierre ponce.
- Fixer le ballon au support par une pince et le placer dans le chauffe-ballon posé sur un support élévateur.
- *Pour la distillation*, placer sur le ballon l'allonge coudée puis le condenseur (ou réfrigérant), qui sera maintenu par une pince fixée à un support.
- *Pour le chauffage à reflux*, placer sur le ballon le réfrigérant.
- Relier le tuyau d'arrivée d'eau froide au robinet, puis au bas du condenseur.
- Placer une extrémité du tuyau de sortie d'eau en haut du condenseur, puis l'autre extrémité dans l'évier.
- Ouvrir avec précaution le robinet et régler un débit d'eau assez faible.
- Mettre en marche le chauffe-ballon, puis régler le thermostat de manière à obtenir une ébullition douce.



Montage de distillation



Montage de chauffage à reflux

3 Rôle des différents éléments

- Le **réfrigérant** (ou condenseur) permet d'éviter les pertes de matière (réactifs, produits, solvants, espèces spectatrices) par évaporation. Il est important que l'eau arrive par le bas du réfrigérant et ressorte par le haut.

Attention !
Le haut du réfrigérant ne doit pas être bouché (risque de surpression dans le montage).

- La **pierre ponce** permet de réguler l'ébullition en favorisant la formation de bulles d'air au sein du liquide.
- Le **support élévateur** est un élément de sécurité : il permet de descendre rapidement le chauffe-ballon afin d'interrompre le chauffage en cas de besoin (emballement de la réaction).

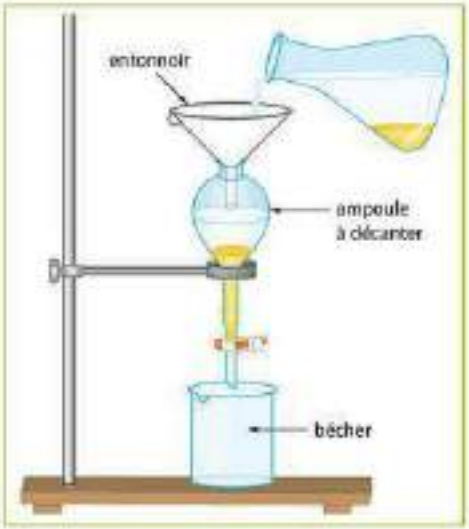
FICHE PRATIQUE 17

Utiliser une ampoule à décanter

Une ampoule à décanter permet de séparer deux liquides non miscibles. Elle permet également d'extraire une espèce chimique d'un mélange en utilisant un solvant (non miscible au mélange) dans lequel l'espèce est plus soluble que dans le milieu d'origine.

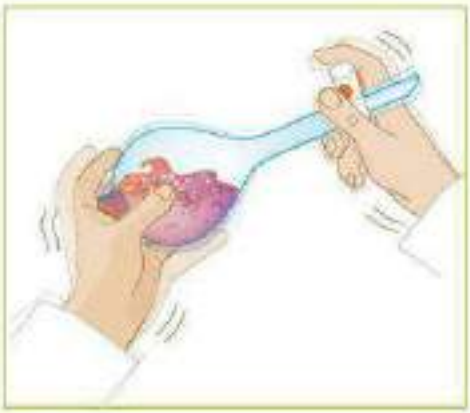
1 Introduction du mélange ►

- Placer l'ampoule à décanter sur son support. Fermer le robinet et placer un bécher en dessous.
- Introduire dans l'ampoule, à l'aide d'un entonnoir, le mélange des deux liquides non miscibles que l'on souhaite séparer (on prend ici l'exemple du cyclohexane et de l'eau iodée).



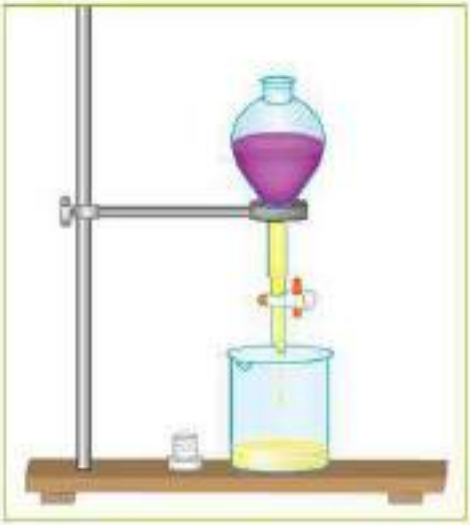
2 Extraction et dégazage ►

- Placer le bouchon sur l'ampoule puis la sortir de son support.
- En tenant le bouchon avec une main, incliner l'ampoule, comme indiqué ci-contre. L'ouverture de l'ampoule doit être dirigée vers un espace inoccupé.
- En maintenant toujours le bouchon, agiter l'ampoule doucement. De temps en temps, ouvrir le robinet pour éviter des problèmes de surpression dans l'ampoule : c'est le **dégazage.**



3 Séparation des liquides ►

- Replacer l'ampoule sur son support. Enlever le bouchon et attendre quelques instants que les deux liquides non miscibles se séparent.
- Ouvrir le robinet et recueillir le premier liquide qui s'écoule (le plus dense).
- Fermer le robinet quand le second liquide (ici le cyclohexane contenant le diiode) arrive au niveau du robinet et changer de récipient pour le recueillir si besoin.



FICHE PRATIQUE 18

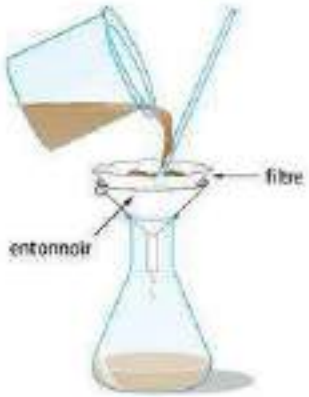
Réaliser une filtration

La filtration permet de séparer un solide et un liquide.
Deux techniques de filtration peuvent être utilisées au laboratoire.

1 Filtration par gravité

a. Principe

Dans la filtration par gravité, on utilise un filtre en papier à travers lequel le liquide s'écoule sous la seule action de son poids.

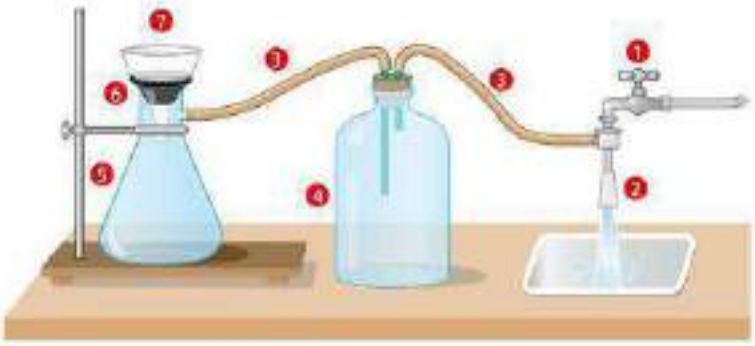


b. Mise en œuvre expérimentale

- Placer un entonnoir sur un erlenmeyer. Mettre un papier-filtre de taille adaptée dans l'entonnoir.
- Afin de mettre le solide en suspension, agiter le mélange à filtrer contenu dans un bécher. Le verser ensuite par petites portions dans l'entonnoir, le long d'un agitateur de verre, qui reste en contact avec le papier-filtre.
- Pour finir, le solide peut être rincé délicatement avec un solvant approprié dans lequel il n'est pas (ou très peu) soluble.

2 Filtration sous pression réduite

1. robinet
2. trompe à eau
3. tuyau de raccord
4. fiole de garde
5. fiole à vide où le filtrat est recueilli
6. joint
7. entonnoir Büchner muni d'un papier-filtre



a. Principe

La filtration sous pression réduite est plus rapide et plus efficace que la filtration simple.

On utilise l'eau qui coule d'un robinet pour créer une dépression sous l'entonnoir et aspirer le liquide à filtrer. Un filtre posé sur le fond de l'entonnoir retient le solide et laisse passer le liquide.

La fiole de garde permet d'éviter que de l'eau n'arrive dans la fiole à vide en cas d'erreur de manipulation.

b. Mise en œuvre expérimentale

- Fixer la fiole à vide à l'aide d'une pince sur un support de montage.
- Vérifier la présence d'un joint entre la fiole à vide et l'entonnoir Büchner.
- Placer un papier-filtre qui doit recouvrir les trous de l'entonnoir Büchner.
- Ouvrir à fond le robinet de la trompe à eau.
- Verser le mélange à séparer dans le Büchner. Afin d'améliorer le séchage du solide, on peut l'écraser (avec un bouchon retourné, par exemple).
- Avant de fermer le robinet à la fin de la filtration, débrancher le tuyau de la trompe à eau, pour éviter que la faible pression dans ce tuyau ne provoque une aspiration de l'eau dans la fiole de garde.
- Récupérer le solide dans le Büchner.

FICHE PRATIQUE 19

ANIMATION
Chromatographie sur couche mince

Réaliser une chromatographie sur couche mince

La chromatographie sur couche mince (CCM) permet de séparer et d'identifier des espèces chimiques présentes dans un mélange.

1 Préparation de la cuve

- Si besoin, préparer le mélange de solvants qui constituera **l'éluant**, puis en verser dans la cuve à chromatographie afin d'obtenir une hauteur de liquide d'environ 1 cm.
- Boucher la cuve afin d'éviter l'évaporation des solvants.

2 Préparation de la plaque

Attention !
Si la plaque utilisée est une plaque de silice, elle est très fragile. Éviter de la toucher avec les doigts.

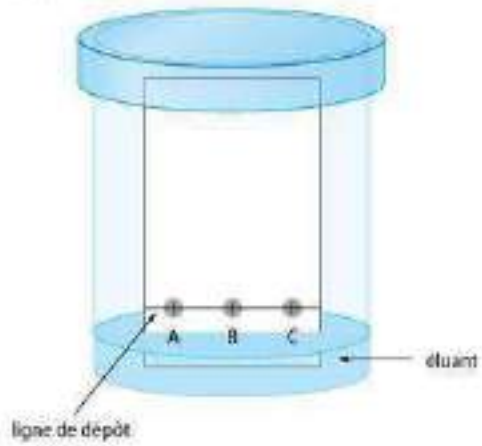
- Tracer au crayon gris, à environ 1,5 cm du bord inférieur de la plaque, un trait qui constitue la ligne de dépôt.
- Placer sur cette ligne des marques, régulièrement espacées, dont le nombre est égal à celui des échantillons à déposer.

3 Dépôt des échantillons

- À l'aide d'une pointe fine, déposer les échantillons sur leurs marques respectives. La tache de dépôt ne doit pas dépasser 3 mm, et il faut changer de pointe pour chaque échantillon.

4 Élution

- Introduire la plaque verticalement dans la cuve : la ligne de dépôt doit être au-dessus du niveau de l'éluant. Boucher la cuve.



Plaque préparée avec dépôts

- L'éluant contenu dans la cuve monte le long de la plaque : c'est l'étape d'**élution**. Attendre que l'éluant arrive à environ 1 cm du haut de la plaque, puis retirer la plaque et repérer par un trait la hauteur maximale atteinte par l'éluant (c'est la **ligne de front**). Sécher la plaque (à l'aide d'un sèche-cheveux par exemple).

5 Révélation du chromatogramme

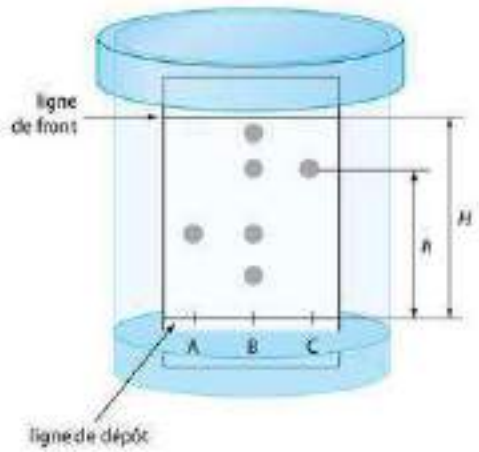
- Dans le cas de composés colorés, le chromatogramme est directement exploitable.
- Pour les produits incolores, il est nécessaire de faire apparaître les taches : c'est l'étape de **révélation**. On peut pour cela utiliser une lampe à ultraviolet, des vapeurs de diiode ou une solution de permanganate de potassium.

Attention !
Ne pas regarder directement la lumière d'une lampe à ultraviolet.

- Entourer chaque tache au crayon.

6 Exploitation du chromatogramme

- Mesurer la hauteur parcourue par l'éluant entre les deux traits repérés sur la plaque. On la note H.
- Mesurer la hauteur parcourue par une tache, entre la ligne de dépôt et sa hauteur finale. On la note h.
- Le **rapport frontal** R de ce composé peut être calculé par la formule $R = \frac{h}{H}$.



Chromatogramme après élution

FICHE PRATIQUE 20

Réaliser une recristallisation

1 Principe

À l'issue d'une synthèse, le produit brut obtenu n'est généralement pas pur. Ainsi la mesure de la température de fusion de ce solide brut donne une valeur souvent inférieure à celle indiquée dans les tables.

Il est alors possible de purifier le produit brut par recristallisation.

C'est la différence de solubilité dans un solvant du produit recherché et des impuretés, en fonction de la température, qui va permettre la séparation. En général, la solubilité d'un solide augmente avec la température du solvant.

Cette méthode, la plus courante pour éliminer la majorité des impuretés, est utilisée au laboratoire comme dans l'industrie.

2 Choix du solvant

Choisir un solvant dans lequel :
- le produit est peu soluble à froid et relativement soluble à chaud ;
- les impuretés sont solubles à froid.

L'eau ou l'alcool sont les solvants les plus souvent utilisés.

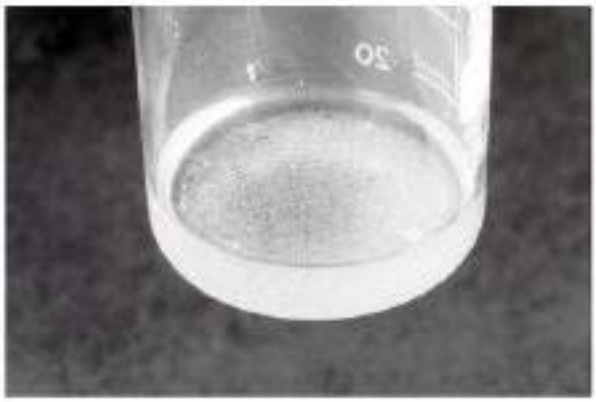
3 Mise en œuvre

On va dissoudre le produit brut dans le minimum de solvant chaud. Pour cela ajouter au solide le solvant porté à ébullition par petites quantités, jusqu'à le dissoudre entièrement.

Laisser ensuite refroidir la solution dans un bain d'eau glacée en agitant.



Le produit cristallise seul, les impuretés restant en solution dans le solvant.



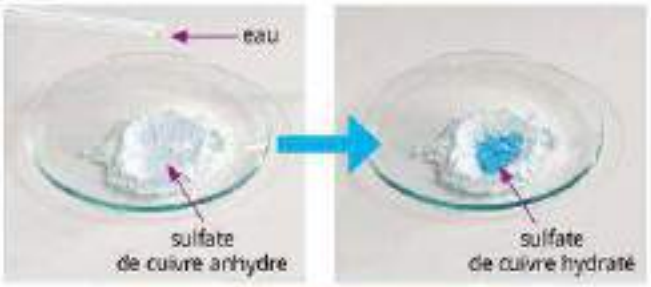
En cas de « retard à la cristallisation », on peut favoriser la formation du premier cristal en grattant les parois internes du récipient à l'aide d'une baguette de verre ou en introduisant, si on en possède, un cristal du composé à recristalliser.

FICHE PRATIQUE 21

Mettre en œuvre un test d'identification d'espèces chimiques

Comment vérifier la présence d'une espèce chimique courante ?

Quelques tests simples peuvent être mis en œuvre pour valider la présence d'espèces chimiques que l'on rencontre fréquemment en chimie.

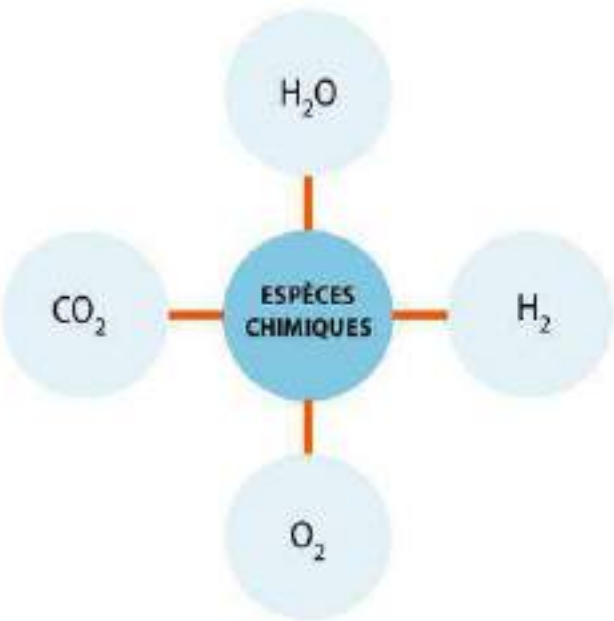


Bleuit le sulfate de cuivre anhydre.





Trouble l'eau de chaux.







Détone en présence d'une flamme.





Ravive une allumette incandescente.

FICHE PRATIQUE 22

VIDÉO Banc Kofler

Mesurer une température de fusion

La température de fusion est caractéristique d'une espèce chimique. Elle se mesure facilement à l'aide d'un banc Kofler.

1 Principe



L'appareil, électrique, est muni d'une plaque chauffante dont la température augmente régulièrement d'un bout à l'autre, passant de 50 à 260 °C. Un **curseur** repère le passage de l'état solide à l'état liquide. L'**index** pointe la température de fusion recherchée sur une **échelle graduée.**

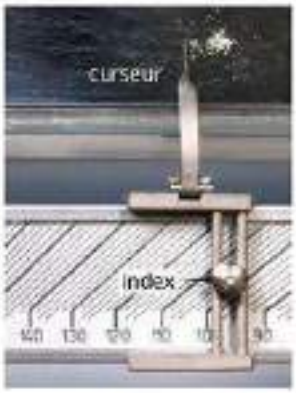
L'appareil nécessite un **étalonnage** à l'aide de **solides étalons** dont la température de fusion est connue.

Remarque : un produit pur présente un point de fusion bien net, alors que le passage de l'état solide à l'état liquide est plus étalé lorsque des impuretés sont présentes. En ce cas, il faut prévoir une étape de purification (par exemple par recristallisation).

2 Préparation de la mesure



- Allumer le banc au moins 30 minutes avant la mesure.
- Déposer une petite quantité de solide sec (quelques cristaux) à l'extrémité froide de la plaque.
- Avec la pointe d'une spatule, déplacer lentement le solide, en biais, vers l'extrémité chaude.
- Dès que les premières gouttes de liquide apparaissent, abaisser le curseur entre le liquide et le solide restant.
- Lire la valeur indiquée par l'index : elle fournit une valeur approximative de la température de fusion recherchée.
- Nettoyer la plaque avec un coton imbibé d'un peu d'éthanol.



3 Étalonnage et mesure

- Recommencer l'opération avec un solide étalon dont la température de fusion est proche de la température mesurée précédemment.
- Après avoir abaissé le curseur, placer la pointe de l'index sur la température théorique de fusion du solide étalon. Le banc Kofler est alors étalonné.
- Nettoyer le banc en prenant garde à ne plus modifier la position de l'index. Refaire une mesure avec le solide étudié pour déterminer sa température de fusion.



FICHE PRATIQUE 23

Utiliser un logiciel de traitement de vidéos

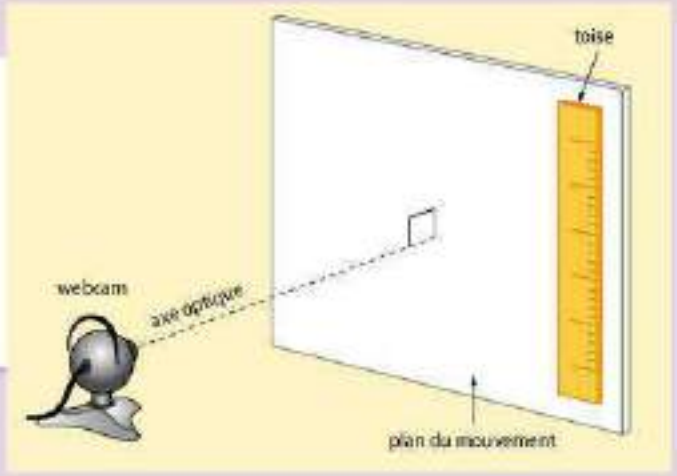
Enregistrer le mouvement d'un objet permet ensuite de l'analyser.
Un logiciel de traitement de vidéo (ou une application de smartphone dédiée) permet de décomposer l'enregistrement image par image, donc de décomposer le mouvement.

1 Enregistrement d'une vidéo

Pour que l'enregistrement vidéo du mouvement d'un objet soit exploitable, il faut s'assurer que :

– le mouvement ait lieu dans un **plan perpendiculaire** à l'axe optique du capteur de la caméra ;

– l'objet de dimensions connues ou la règle graduée ait été positionné dans le plan du mouvement (la règle permet l'**étalonnage** des longueurs).



2 Traitement de la vidéo

a. Étalonnage

Il s'agit de faire correspondre les dimensions observées sur l'écran aux dimensions réelles. Pour cela, le logiciel propose de faire correspondre une valeur réelle à un segment à construire sur l'écran.

On choisit comme segment la longueur sur l'écran de l'objet de dimensions connues.



b. Repère d'espace

Il s'agit d'identifier un repère d'espace avec une origine. Pour cela, le logiciel propose de cliquer sur un point de l'écran qui est choisi comme origine, puis oriente l'espace par deux axes.

On choisit généralement l'origine à la position de départ de l'objet dont on étudie le mouvement.



c. Pointage

Il s'agit de repérer image par image les positions successives occupées par l'objet au cours du temps. Pour cela, le logiciel propose de cliquer image par image sur un point de l'écran.

On choisit généralement comme point d'étude le centre de l'objet dont on étude le mouvement.



3 Exploitation

À l'aide d'un tableur-grapheur ou d'un logiciel de programmation, il est ensuite possible d'exploiter les coordonnées (t, X, Y) des points.

Ord.	t	X	Y
Unité	s	m	m
1	0,000	0,000	0,001
2	0,040	0,000	0,009
3	0,080	0,001	0,025
4	0,120	-0,001	0,045
5	0,160	0,000	0,073
6	0,200	0,000	0,105
7	0,240	0,000	0,137
8	0,280	0,000	0,168
9	0,320	0,001	0,193
10	0,360	0,000	0,216
11	0,400	0,000	0,239
12	0,440	-0,001	0,260
13	0,480	0,001	0,286

FICHE PRATIQUE 24

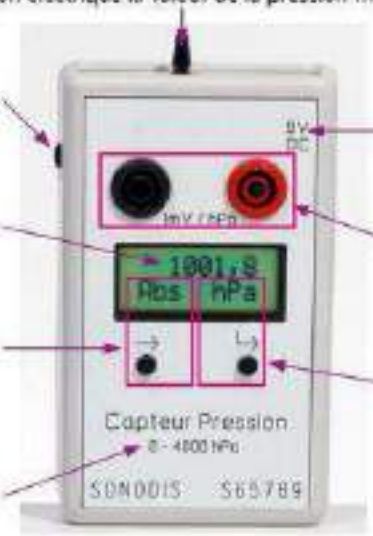
Mesurer une pression

Pour mesurer la pression dans un gaz ou dans un liquide, on utilise un manomètre ou un capteur de pression (parfois nommé pressiomètre). Le baromètre mesure, quant à lui, la pression atmosphérique.

1 S'approprier l'instrument de mesure

Quel que soit le modèle utilisé, les principaux éléments de l'appareil décrits ci-dessous sont présents.

Entrée du capteur de pression
À relier au fluide par l'intermédiaire d'un tuyau, d'une seringue, d'une sonde.
Ne jamais introduire de liquide dans le capteur.
Le capteur convertit en tension électrique la valeur de la pression mesurée (ici 1 mV pour 1 hPa)



Mise en marche

Écran d'affichage numérique
La plus petite valeur mesurée est nommée résolution (ici 0,1 hPa)

Choix du type de mesure
Pression absolue **Abs**
ou Pression relative **Rel**

Plage de mesure
la **portée** de l'appareil ne doit jamais être dépassée (ici 4 000 hPa)

Tension d'alimentation
(ici continue : 9 V)

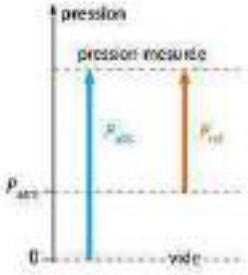
Bornes de sortie analogique
À relier à n'importe quel appareil mesurant une tension (voltmètre, microcontrôleur, système d'ExAO...)

Choix de l'unité
hectopascal **hPa** ou millibar **mbar**

2 Réaliser des mesures

a. Pression absolue ou pression relative

Une pression absolue (P_{abs}) est mesurée à partir du vide ($P = 0$ bar). Une pression relative (P_{rel}) est mesurée par rapport à la pression atmosphérique ($P_{atm} \approx 1$ bar).



b. Mesure de pression

Un encadrement raisonnable de la valeur de la pression P mesurée est obtenue à partir d'une lecture sur l'écran d'affichage numérique (ou indiquée par la position de l'aiguille dans le cas d'un manomètre à aiguille).

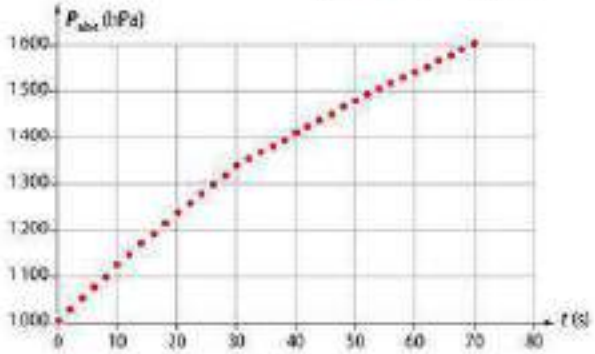
EXEMPLE

On estime P compris entre 1 001,3 hPa et 1 002,3 hPa.

Le meilleur estimateur de la pression P mesurée est le milieu de cet intervalle et l'incertitude-type u_p associée à cette mesure correspond à la demi-largeur de l'intervalle défini.

EXEMPLE

La pression est estimée à $P = 1\,001{,}8$ hPa avec une incertitude-type associée $u_p = 0{,}5$ hPa.



FICHE PRATIQUE 25

Mesurer un niveau d'intensité sonore

Un sonomètre (ou décibelmètre) est un instrument de mesure du niveau sonore.

1 Présentation

Un sonomètre est constitué d'un microphone relié à un boîtier numérique composé d'un écran d'affichage et de plusieurs fonctionnalités.



Un sonomètre mesure un niveau sonore L exprimé en décibel, de symbole dB.

2 Précautions de mesure

- Pour éviter que les réflexions sonores ne faussent la mesure, orienter le sonomètre avec le microphone dirigé face à la source. Pour cela, utiliser un support de fixation ou le tenir à bout de bras.
- Pour mesurer le niveau sonore d'une source, veiller à ce qu'aucune autre source ne vienne perturber la mesure (voix, bruit de déplacement du matériel, etc.).

3 Fonctions et réglages

Sur la majorité des sonomètres sont proposées les fonctions suivantes.

a. Temps d'intégration : fast/slow ou F/S

La fonction temps d'intégration (fast/slow ou F/S) détermine le temps d'acquisition de la mesure.

- Pour les mesures effectuées au lycée, choisir le mode lent (slow ou S) et penser à attendre la stabilisation de la mesure.

b. Filtres de pondération fréquentielle : A/C

Deux modes de pondération fréquentielle sont proposés : pondération A (mesures en dB(A)) ou pondération C (mesures en dB(C)).

La pondération A tient compte de la sensibilité de l'oreille, qui diffère selon les fréquences. On utilise la pondération A lorsqu'on évalue les risques d'une source pour l'appareil auditif humain.

La pondération C est utilisée pour contrôler le bruit des machines.

Pour les mesures effectuées au lycée, sélectionner la pondération A.

Les tables de pondération (A et C) sont données dans la notice de l'appareil. Elles permettent de retrouver, si nécessaire, le niveau sonore réel pour une fréquence donnée.

Caractéristiques des filtres A et C			
Fréquence (Hz)	Filtre A (dB)	Filtre C (dB)	Précision
31,5 Hz	– 39,4 dB	– 3,0 dB	± 3,0 dB
63,0 Hz	– 26,2 dB	– 0,8 dB	± 2,0 dB
125 Hz	– 16,1 dB	– 0,2 dB	± 1,5 dB
250 Hz	– 8,6 dB	0,0 dB	± 1,5 dB
500 Hz	– 3,2 dB	0,0 dB	± 1,5 dB
1 kHz	0,0 dB	0,0 dB	± 1,5 dB
2 kHz	+ 1,2 dB	– 0,2 dB	± 2,0 dB
4 kHz	+ 1,0 dB	– 0,8 dB	± 3,0 dB
8 kHz	+ 1,1 dB	– 3,0 dB	± 5,0 dB

Extrait de notice d'un sonomètre.

c. Réglage de la gamme de niveau sonore : RNG ou Hi/Lo

La fonction de réglage de la gamme de niveau sonore permet de choisir l'intervalle de niveau sonore des mesures.

- Évaluer par un premier test le niveau sonore de la source, puis choisir manuellement la gamme de niveau sonore la plus adaptée.

Ce réglage peut aussi se faire automatiquement, la mention « auto » s'affichant alors sur l'écran.

Un indicateur de dépassement de gamme s'activera sur l'écran si la gamme utilisée n'est pas adaptée.

4 Précision des mesures

La précision des mesures effectuées dépend de la fréquence. L'intervalle de confiance pour chaque fréquence est indiqué sur la notice, dans les tables de pondération.

FICHE PRATIQUE 26

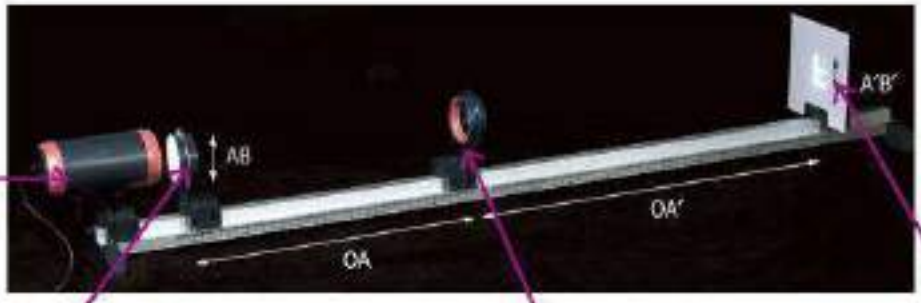
Réaliser un montage d'optique

Réaliser un montage d'optique consiste à placer les éléments optiques les uns par rapport aux autres, de manière à former l'image nette d'un objet lumineux.

1 Les éléments du montage d'optique

Tout montage d'optique est constitué d'une **source de lumière**, d'un **objet**, d'une ou plusieurs **lentilles** et d'un **écran**. Ces éléments sont placés sur une monture. Ils sont disposés sur un support rectiligne, horizontal et gradué, sur lequel ils peuvent coulisser tout en restant alignés : le **banc d'optique**. Outre l'alignement des éléments d'optique, le banc d'optique permet, à partir d'un repérage des positions, la réalisation de mesures.

La **source** de lumière, reliée à un générateur, permet d'éclairer l'objet.



L'**objet**, dont on souhaite former une image nette, est accolé à la source afin d'être le plus **lumineux** possible. Il s'agit, par exemple, d'une lettre gravée dans une diapositive.

La **lentille** mince, placée sur une monture, est indispensable à la formation de l'image.

L'**écran** permet d'observer et d'identifier la position de l'**image** nette formée.

Une feuille de papier millimétré peut être utilisée pour mesurer sa grandeur.

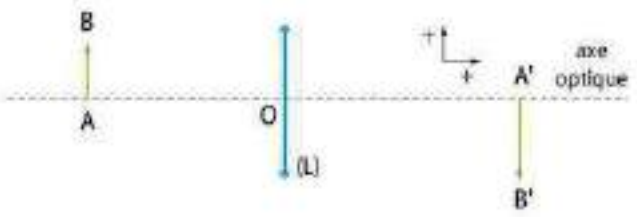
2 Alignement et réglage du dispositif expérimental

1. Placer la source de lumière sur le banc, l'allumer et y accoler l'objet.
2. Se placer dans l'obscurité.
3. Déplacer l'ensemble source-objet lumineux, de manière à positionner l'objet sur la graduation zéro du banc d'optique.
4. Disposer la lentille convergente à une distance de l'objet supérieure à sa distance focale f.
5. Déposer l'écran sur le banc d'optique. Le déplacer jusqu'à y faire apparaître une image nette de l'objet.

À chaque étape, prendre soin de vérifier l'alignement vertical des éléments optiques.

3 Réalisation des mesures

- Tout montage d'optique est associé à un schéma optique. Sur la représentation ci-contre, A désigne la position de l'objet, O celle du centre optique de la lentille et A' la position de l'image formée.
- Les axes sont orientés et les longueurs algébrisées : $\overline{OA} < 0$; $\overline{AB} > 0$; $\overline{OA'} > 0$; $\overline{A'B'} < 0$.
- Sur le montage, l'axe optique de la lentille est parallèle au banc d'optique.



FICHE PRATIQUE 27

Réaliser un circuit électrique

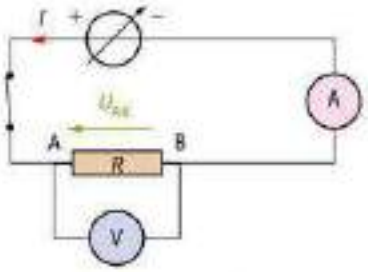
Réaliser le montage d'un circuit consiste à relier entre eux les différents dipôles par des fils de connexion, en respectant les informations données par le schéma électrique.

1 Préparation du matériel à partir du schéma électrique

Sur le plan de travail, disposer les composants électriques nécessaires à la réalisation du montage. Pour un montage clair, il est préférable d'espacer suffisamment les dipôles.

EXEMPLE

Pour tracer la caractéristique d'une résistance *R*, on donne le schéma ci-dessous.



Le matériel nécessaire à la réalisation de ce circuit est : un générateur de tension réglable de 0 à 6 V ; un interrupteur ; 6 fils de connexion ; une résistance *R* ; un voltmètre ; un ampèremètre.



2 Réalisation du montage

Relier entre eux les éléments de la boucle principale du circuit, où les dipôles sont montés en série.

- On commence généralement en partant de la borne positive du générateur, et en utilisant préférentiellement un fil de connexion de couleur rouge. On termine en arrivant à la borne négative du générateur, en utilisant préférentiellement un fil de connexion de couleur noire.
- Repérer les dipôles polarisés (multimètre par exemple) et en déduire le sens de branchement par rapport au sens conventionnel du courant électrique.
- L'interrupteur doit être en position ouverte (ou le générateur éteint) durant toute la phase de réalisation du montage.

EXEMPLE



- Terminer la réalisation du montage en reliant les dipôles ou les parties qui sont en dérivation sur la branche principale.

EXEMPLE



- Ce circuit pourra alors être mis sous tension, en fermant l'interrupteur, une fois qu'il aura été vérifié.

FICHE PRATIQUE 28

ANIMATION Oscilloscope AC/DC

Utiliser un oscilloscope

L'oscilloscope est un outil d'observation et d'analyse de signaux électriques.

1 Principe et constitution

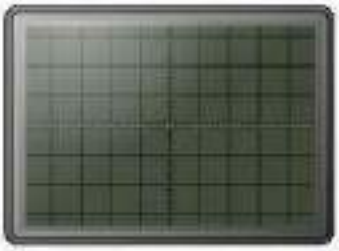
Un oscilloscope est un appareil qui permet de visualiser **l'évolution d'une tension électrique en fonction du temps**.



Il **se branche aux bornes d'un dipôle** (générateur ou récepteur) dont on veut observer le signal de la tension.

2 Préréglages

En l'absence de signal à l'entrée et si la base de temps n'est pas enclenchée, un trait horizontal au centre de l'écran doit être observé (il correspond à une tension nulle) :



Pour centrer ce trait horizontal, agir sur les boutons de réglage « Y Pos » et « X Pos ».

3 Analyse d'un signal à l'oscilloscope

a. À l'aide de la base de temps

La **base de temps** permet de définir l'échelle horizontale de la représentation graphique sur l'écran.

Une **division** (div) représente un carreau de l'écran.

EXEMPLE

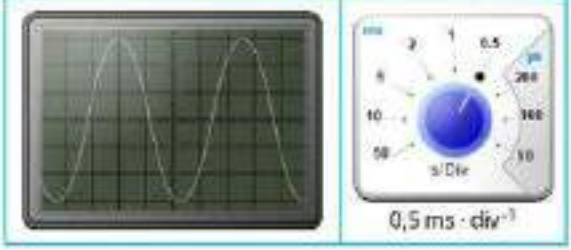
Mesure d'un signal de fréquence de 440 Hz.

Mauvais réglage



2 ms · div⁻¹

Bon réglage



0,5 ms · div⁻¹

b. À l'aide de la sensibilité verticale

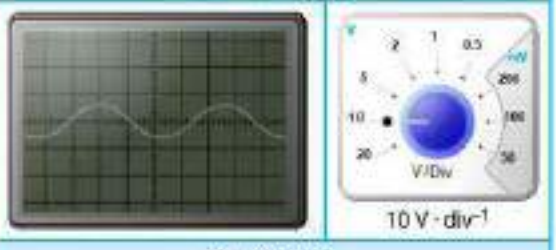
La **sensibilité verticale** permet de définir l'échelle verticale de la représentation graphique sur l'écran.

Une division (div) représente un carreau de l'écran. La représentation graphique doit occuper tout l'écran.

EXEMPLE

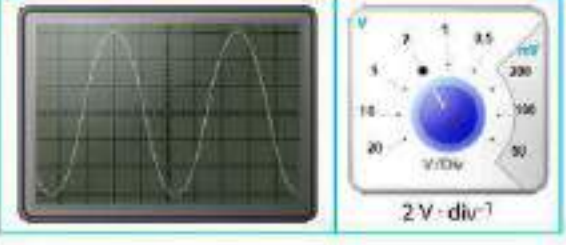
Mesure d'un signal d'amplitude 6 V.

Mauvais réglage



10 V · div⁻¹

Bon réglage



2 V · div⁻¹

COUPS DE POUCE

Chapitre 1

1. Déterminer le nombre de doublets liants et non liants des atomes constituant les molécules d'acide méthanoïque et de N-méthylméthanamine.
Si besoin, voir coup de pouce, p. 594.

Chapitre 2

1. Repérer dans l'équation bilan (doc. 1) les formules chimiques des molécules d'éthanol et d'acide acétique. Écrire leur formule semi-développée.
Si besoin, voir coup de pouce, p. 594.

Chapitre 3

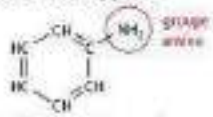
1. Parmi les ions présents dans le déboucheur, lequel est responsable de son action corrosive ?
Si besoin, voir coup de pouce, p. 594.

Chapitre 1

1 B. **2** C. **3** B. **4** A et B. **5** B et C. **6** A, B et C. **7** B. **8** C. **9** C.

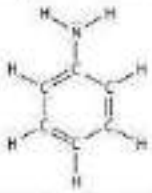
10 1. Voir Cours.
2. Acide / Base : H_3PO_4 / $H_2PO_4^-$; H_2O / HO^- ; ClOH / ClO^- ; H_2S / HS^- ; HS^- / S^{2-} ; NH_4^+ / NH_3.

17 1. a. et b. Formule brute : C_6H_7N.
Formule semi-développée :



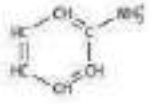
La famille chimique des amines.

c.



2. a. Une base selon Brønsted, car elle est capable de capter un ion H^+ grâce au doublet non liant présent sur l'azote.

b. Formule semi-développée :



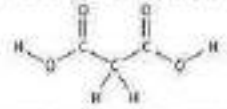
Représentation de Lewis :



18 1. CO_2 (g), H_2O (ℓ) / HCO_3^- (aq) et HCO_3^- (aq) / CO_3^{2-} (aq).
2. Une espèce amphotère.

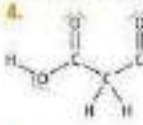
19 1. La chaîne principale carbonée de cette molécule possède 3 atomes de carbone, d'où le nom de **propane**.
La molécule possède **deux** groupes carboxyle, le groupe carboxyle est caractéristique des acides carboxyliques, d'où le nom d'**acide** et la terminaison **dioïque**.

2.



3. L'acide malonique, qui possède deux groupes carboxyle, est un diacide car cette molécule est capable de libérer deux ions H^+.

4.



5.

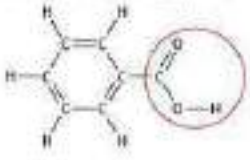


6. L'ion hydrogénomalonate $C_3O_4H_3^-$ (aq) est la base du couple $C_3O_4H_4$ (aq) / $C_3O_4H_3^-$ (aq) et l'acide du couple $C_3O_4H_3^-$ (aq) / $C_3O_4H_2^{2-}$ (aq). L'ion $C_3O_4H_3^-$ (aq) est une espèce amphotère.

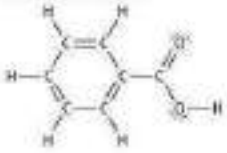
23 1 $CH_3NH_3^+$ (aq) + $CH_3CO_2^-$ (aq) ⇄ CH_3NH_2 (aq) + CH_3CO_2H (aq)
2 H_3O^+ (aq) + $CH_3CO_2^-$ (aq) ⇄ H_2O (ℓ) + CH_3CO_2H (aq)
3 H_2O (ℓ) + $CH_3CO_2^-$ (aq) ⇄ HO^- (aq) + CH_3CO_2H (aq)
4 CH_3CO_2H (aq) + CH_3NH_2 (aq) ⇄ $CH_3CO_2^-$ (aq) + $CH_3NH_3^+$ (aq)
5 H_3O^+ (aq) + CH_3NH_2 (aq) ⇄ H_2O (ℓ) + $CH_3NH_3^+$ (aq)
6 H_2O (ℓ) + CH_3NH_2 (aq) ⇄ HO^- (aq) + $CH_3NH_3^+$ (aq)
7 CH_3CO_2H (aq) + H_2O (ℓ) ⇄ $CH_3CO_2^-$ (aq) + H_3O^+ (aq)
8 $CH_3NH_3^+$ (aq) + H_2O (ℓ) ⇄ CH_3NH_2 (aq) + H_3O^+ (aq)
9 H_2O (ℓ) + H_2O (ℓ) ⇄ HO^- (aq) + H_3O^+ (aq)
10 CH_3CO_2H (aq) + HO^- (aq) ⇄ $CH_3CO_2^-$ (aq) + H_2O (ℓ)
11 $CH_3NH_3^+$ (aq) + HO^- (aq) ⇄ CH_3NH_2 (aq) + H_2O (ℓ)
12 H_3O^+ (aq) + HO^- (aq) ⇄ H_2O (ℓ) + H_2O (ℓ)

24 1. $(NH_4)_3PO_4$ (s).
2. $(NH_4)_3PO_4$ (s) → 3 NH_4^+ (aq) + PO_4^{3-} (aq)
3. Une solution aqueuse de cet engrais contient les ions NH_4^+ (aq) et PO_4^{3-} (aq).
NH_4^+ (aq) est l'acide du couple NH_4^+ (aq) / NH_3 (aq) et PO_4^{3-} (aq) est la base du couple HPO_4^{2-} (aq) / PO_4^{3-} (aq).
Une réaction acide-base peut donc se produire entre les ions NH_4^+ (aq) et PO_4^{3-} (aq).
4. NH_4^+ (aq) + PO_4^{3-} (aq) ⇄ NH_3 (aq) + HPO_4^{2-} (aq)

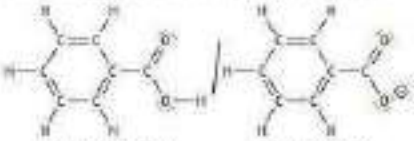
28 1. Formule semi-développée :



Représentation de Lewis :



2. L'ion benzoate $C_6H_5CO_2^-$.
3. Lorsque l'acide $C_6H_5CO_2H$ perd l'ion H^+ pour former sa base conjuguée, le doublet liant entre l'atome d'oxygène O et l'hydrogène H se transforme en doublet non liant, puisque l'atome H part en laissant son électron.
L'oxygène O se retrouve alors avec un électron en plus et porte donc une charge négative.



acide benzoïque — ion benzoate

30 1. $NaHCO_3$ (s) → Na^+ (aq) + HCO_3^- (aq)
2. L'acide AH présent dans le plat réagit avec l'ion hydrogénocarbonate HCO_3^- (aq) suivant la réaction :
AH (aq) + HCO_3^- (aq) ⇄ A^- (aq) + CO_2 (aq), H_2O (ℓ)
L'ajout d'hydrogénocarbonate de sodium permet de transformer l'acide AH en sa base conjuguée A^- (aq).

31 1. La formule de l'ion ascorbate est $C_6H_7O_6^-$ (aq). Le couple acide-base s'écrit : $C_6H_8O_6$ (aq) / $C_6H_7O_6^-$ (aq).
2. $NaHCO_3$ (s) + H_2O → Na^+ (aq) + HCO_3^- (aq)
3. L'ion HCO_3^- appartient aux couples acide-base : CO_2 (g), H_2O (ℓ) / HCO_3^- (aq) et HCO_3^- (aq) / CO_3^{2-} (aq).
4. Les deux réactifs de la réaction sont l'acide ascorbique $C_6H_8O_6$ (aq) et l'ion HCO_3^- (aq).
Les couples acide-base mis en jeu sont : $C_6H_8O_6$ (aq) / $C_6H_7O_6^-$ (aq) et CO_2 (g), H_2O (ℓ) / HCO_3^- (aq).
5. $C_6H_8O_6$ + HCO_3^- → $C_6H_7O_6^-$ + CO_2 (g), H_2O (ℓ)
Le gaz produit est du dioxyde de carbone.

35 Démarche avancée
1. a. CO_2 (g), H_2O (ℓ) + H_2O (ℓ) ⇄ H_3O^+ (aq) + HCO_3^- (aq)
b. Car cette réaction produit la formation d'ions H_3O^+ (aq), leur concentration augmente, la solution devient de plus en plus acide et le pH diminue.
2. a. CO_2 (g), H_2O (ℓ) + ClO^- (aq) ⇄ HCO_3^- (aq) + HClO (aq)
b. La formation d'acide hypochloreux HClO (aq) est favorisée, cet acide est un désinfectant plus efficace que l'ion hypochlorite ClO^- (aq) car il possède un pouvoir bactéricide plus important.

41 1. CH_3CO_2H (aq) + HCO_3^- (aq) → $CH_3CO_2^-$ (aq) + CO_2 (g), H_2O (ℓ)
Le gaz formé est le dioxyde de carbone.

2. Les bulles de dioxyde de carbone se forment à l'interface gouttelette de vinaigre / hydrogénocarbonate de sodium. Ces bulles s'accrochent tout autour des gouttelettes de vinaigre. Le volume des bulles de gaz augmente progressivement jusqu'à ce que les bulles remontent à la surface en entraînant avec elles les gouttelettes de vinaigre. À la surface, les bulles de gaz éclatent, les gouttelettes de vinaigre redescendent donc dans l'huile au fond du récipient. Et ainsi de suite...



3. $x_f = 4{,}4 \times 10^{-3}$ mol
$n(CO_2\,(g)) = x_f$
$V(CO_2\,(g)) = n(CO_2\,(g)) \cdot V_m$
$V(CO_2\,(g)) = 1{,}1 \times 10^{-1}$ L

Synthèse : la lampe à lave est éphémère car le phénomène cesse dès la disparition du réactif limitant.

Chapitre 2

1 C. **2** B et C. **3** A et B.
4 C. **5** B. **6** C. **7** A et B. **8** A.

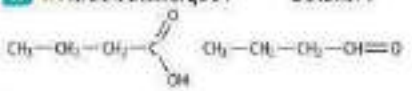
10 1. $[H_3O^+] = 4{,}0 \times 10^{-8}$ mol · L^{-1}
2. On peut rajouter de la solution d'acide chlorhydrique pour augmenter (H_3O^+) et ainsi faire diminuer le pH.

12 1. $pH_1 = 4{,}2$; $pH_2 = 2{,}5$.
2. $2{,}5 < pH < 4{,}2$. 3. Elles sont acides.

15 1. $\lambda_{max} = 525$ nm. 2. Le rouge cochenille.

16 1. Pour E102 : $\lambda_{max} = 430$ nm.
Pour E131 : $\lambda_{max} = 640$ nm.
Pour le sirop de menthe :
$\lambda_{max1} = 430$ nm et $\lambda_{max2} = 640$ nm.
2. La couleur verte du sirop de menthe est obtenue en mélangeant E102 et E131.

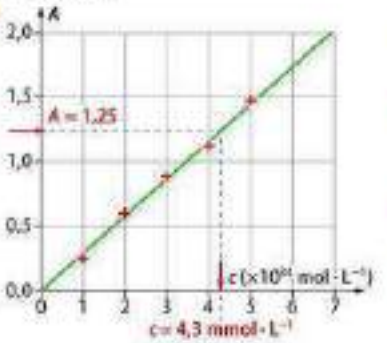
19 1. Acide butanoïque : Butanal :



2. **Acide butanoïque :**
– Bande forte et fine à 1 740 cm^{-1}, caractéristique du groupe C=O des acides carboxyliques.
– Bande forte et large à 3 000 cm^{-1}, caractéristique du groupe O–H des acides carboxyliques.
Butanal :
– Bande forte et fine à 1 720 cm^{-1}, caractéristique du groupe C=O des aldéhydes.
– Bande faible et moyenne 2 830 cm^{-1}, caractéristique du groupe C–H des aldéhydes.
3. Le premier spectre est celui de l'acide butanoïque. Le second est celui du butanal.

20 1. Il faut prélever un volume V_m de solution-mère à l'aide d'une pipette jaugée, l'introduire dans une fiole jaugée de volume V_f et compléter jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée.
2. La quantité de matière prélevée dans la solution-mère est la même que celle dans la solution-fille.
3. Ligne $V_m = 10$ mL : $c_f = 10$ mmol · L^{-1}.
Ligne $V_m = 20$ mL : $c_f = 20$ mmol · L^{-1}.
Ligne $V_m = 30$ mL : $c_f = 30$ mmol · L^{-1}.
Ligne $V_m = 40$ mL : $c_f = 40$ mmol · L^{-1}.
4. On ne peut pas utiliser cette gamme étalon pour vérifier la loi de Beer-Lambert car elle n'est valable que pour des concentrations inférieures à 10^{-2} mol · L^{-1}.

21 1. Il faut se placer à la longueur d'onde correspondant au maximum d'absorption de la solution.
2.

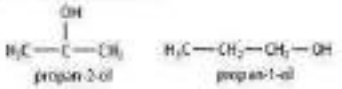


$c = 4{,}3$ mmol · L^{-1}

3. On trouve une droite qui passe par l'origine, A et c sont proportionnelles. La loi de Beer-Lambert est vérifiée.
4. $c = 4{,}3$ mmol · L^{-1}.

24 1. On trouve une droite qui passe par l'origine. σ et c sont proportionnelles. La loi de Kohlrausch est respectée.
2. Pour correspondre à la courbe étalon et parce que la loi de Kohlrausch n'est valide que pour des concentrations supérieures à 10^{-2} mol · L^{-1}.
3. $c_S = 5{,}7$ mol · L^{-1}.

26 1. L'ordonnée correspond à la transmittance en pourcentage. Cette grandeur traduit la capacité d'un échantillon à transmettre la lumière. On trouve en abscisse le nombre d'onde (en cm^{-1}), c'est-à-dire l'inverse de la longueur d'onde.
2. On repère une bande large et forte vers 3 350 cm^{-1} qui permet d'identifier une liaison O–H d'un alcool.
3.



28 1. L'équation de dissolution s'écrit :
$MgSO_4\,(s) \rightarrow Mg^{2+}\,(aq) + SO_4^{2-}\,(aq)$
2. $c_S = 52$ mmol · L^{-1}.
3. $[Mg^{2+}\,(aq)] = c_S = 52$ mmol · L^{-1}.
$[SO_4^{2-}\,(aq)] = c_S = 52$ mmol · L^{-1}.

29 1. Comme $\lambda_{H_3O^+} > \lambda_{Cl^-}$, l'intensité dans le circuit sera plus importante et le dégagement de H_2 plus efficace.
2. $\sigma = \lambda_{H_3O^+} \cdot [H_3O^+] + \lambda_{Cl^-} \cdot [Cl^-]$
$\sigma = (\lambda_{H_3O^+} + \lambda_{Cl^-}) \cdot c$
$\sigma = (35{,}0 \times 10^{-3} + 7{,}6 \times 10^{-3}) \times 10^{-2} \times 10^{3}$
$\sigma = 4{,}26 \times 10^{-3}$ S · m^{-1}
3. Pour multiplier l'intensité par 10, il est possible de multiplier la conductance par 10 en utilisant une solution 10 fois plus concentrée.

30 1. L'ion hydrogène.
2. L'ion oxonium H_3O^+.
3. a. et b.

$$pH = -\log\left(\frac{[H_3O^+]}{c^\circ}\right) = 1.$$

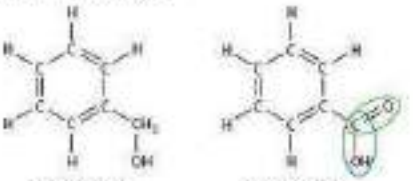
4. Ce calcul n'est pas valide, la solution est trop concentrée. La relation est valide pour $(H_3O^+) < 1{,}0 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.

33 1. a. et b. Voie 1 : groupe hydroxyle, famille des alcools.
Voie 2 : groupe carboxyle, famille des acides carboxyliques.
2. C'est la voie 1 qui a été utilisée pour synthétiser cette molécule et conduire à la nouvelle fonction hydroxyle.

34 Démarche avancée
1. $c = 8{,}2 \times 10^{-6}$ mol · L^{-1}.
2. $m = 32$ g. 3. $m_{charbon} = 3{,}2$ kg.

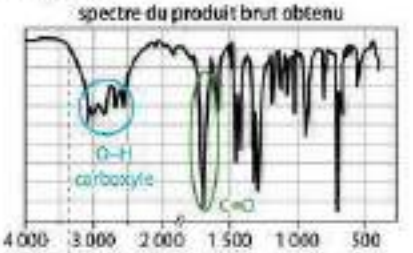
35 1. La solution est ionique, donc conductrice.
2. $c = 4{,}2 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.
3. La loi de Kohlrausch n'est valide que pour des concentrations $c < 10^{-2}$ mol · L^{-1}, la solution S doit donc absolument être diluée ici.
4. $m = 0{,}81$ g. 5. 81 %.

41 Il faut tout d'abord repérer qu'une réaction acide-base a permis de passer de l'ion benzoate à l'acide benzoïque. On peut alors écrire les formules développées des molécules mises en jeu :

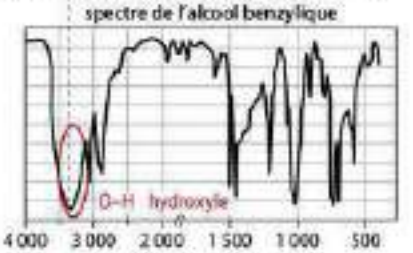


Le spectre du produit brut montre la présence d'une liaison C=O et d'une liaison O–H d'un groupe carboxyle. Ce qui est conforme avec l'acide benzoïque, le produit désiré.
De plus, on constate la disparition de la bande relative à la présence d'une liaison O–H d'un groupe hydroxyle, donc on peut penser qu'il ne reste pas de traces de l'alcool benzylique.

spectre du produit brut obtenu



spectre de l'alcool benzylique



COUPS DE POUCE

Chapitre 1

2. Établir les formules semi-développées et les représentations de Lewis des deux molécules.
Si besoin, voir coup de pouce, p. 595.

Chapitre 2

2. Repérer les groupes d'atomes caractéristiques de chacune des molécules dans les tables de données spectroscopiques.
Si besoin, voir coup de pouce, p. 595.

Chapitre 3

2. Proposer un réactif et écrire l'équation de la réaction support du titrage.
Si besoin, voir coup de pouce, p. 595.

Chapitre 3

1 A. 2 A et C. 3 C. 4 B et C.
5 A, B et C. 6 B et C. 7 B et C.
8 A, B et C. 9 B. 10 C. 11 B et C.
12 C.

15 1. $c = 12\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
2. Fiole jaugée, pipette jaugée et pipeteur, béchers.
3. Prélever à l'aide d'une burette graduée 8,3 mL de la solution commerciale et les verser dans une fiole jaugée de 1 L, puis compléter avec de l'eau distillée jusqu'à 1,0 L.

17 1. $RCO_2H\,(aq) + HO^-\,(aq) \rightarrow RCO_2^-\,(aq) + H_2O\,(\ell)$
2. Une réaction chimique doit être rapide, totale et unique.
3. **Avant l'équivalence :**
$n(RCO_2H_{initial}) - x > 0$ $\quad n(HO^-_{versé}) - x = 0$
$n(HO^-_{versé}) < n(RCO_2H_{initial})$
À l'équivalence :
$n(RCO_2H_{initial}) - x = 0$ $\quad n(HO^-_{versé}) - x = 0$
$n(HO^-_{versé}) = n(RCO_2H_{initial})$
Après l'équivalence :
$n(RCO_2H_{initial}) - x = 0$ $\quad n(HO^-_{versé}) - x > 0$
$n(HO^-_{versé}) > n(RCO_2H_{initial})$

21 1. $AH\,(aq) + HO^-\,(aq) \rightarrow A^-\,(aq) + H_2O\,(\ell)$
2. $V_E = 4{,}0$ mL correspond au maximum de la dérivée de la courbe $pH = f(V)$.
3. $c_5 = 8{,}0 \times 10^{-5}\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
4. Le cheval n'est pas en forme.

23 1. Schéma :



2. La représentation graphique G.
3. $V_E = 11{,}6$ mL.

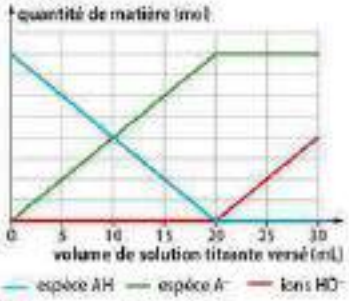
25 1. $c_{conc} = 17\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
2. $H_3O^+\,(aq) + HO^-\,(aq) \rightarrow 2\,H_2O\,(\ell)$
3. $c = 2{,}5 \times 10^{-2}\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
4. $u_c = 0{,}005\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

27 1. $V_E = 8{,}0$ mL.
2. $n(Cl^-) = 1{,}6 \times 10^{-4}$ mol.
3. $m(NaCl)_{calculée} = 9{,}4 \times 10^{-3}$ g.
$m(NaCl)_{lubrifiant} = 9{,}8 \times 10^{-3}$ g.
Les deux masses sont presque égales.

28 1. Le titre massique d'une solution est le quotient de la masse d'acide nitrique contenu dans un litre de solution par la masse d'un litre de solution.
2. $n = \frac{1\,260}{63}$ mol donc $c = 20\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
3. Il faut diluer d'un facteur 100, donc utiliser une pipette jaugée de 1 mL pour une fiole jaugée de 100 mL.

98 Démarche avancée
1. $V_E = 10{,}0$ mL. 2. $n_{C_6H_5CO_2H} = n_{HO^-}$
3. $c_5 = 1{,}0 \times 10^{-2}\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

32 1. $AH\,(aq) + HO^-\,(aq) \rightarrow A^-\,(aq) + H_2O\,(\ell)$
2. a. La ligne 7 car, à l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques.
b. $c_A = 0{,}1\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
3. 20 plt.plot(V_B1,n_b1, color='green')
23 plt.plot(V_B2,n_b2, color='green')
4. Courbe :



38 1. $\rho_{vinaigre} = 1{,}0\ \text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$.
2. • Solution-mère = vinaigre pur :
c_0 mol · L⁻¹ et V_0 à prélever.
• Solution-fille = vinaigre dilué 10 fois :
$c_1 = \frac{c_0}{10}$ mol · L⁻¹ et V_1 préparé.

$c_0 \cdot V_0 = c_1 \cdot V_1 ; c_0 \cdot V_0 = \frac{c_0}{10} \cdot V_1$ donc $V_0 = \frac{V_1}{10}$.

Protocole :
• On prélève à l'aide d'une pipette jaugée 10,0 mL de vinaigre pur.
• On verse ce volume dans une fiole jaugée de 100,0 mL.
• On ajoute de l'eau distillée jusqu'au tiers de la fiole. On agite.
• On ajoute de l'eau jusqu'au trait de jauge, puis on agite à nouveau.
On dispose d'une solution de vinaigre diluée 10 fois.
3. $CH_3CO_2H\,(aq) + H_2O\,(\ell) \rightarrow CH_3CO_2^-\,(aq) + H_3O^+\,(aq)$

Synthèse : on calcule la masse d'acide éthanoïque dans 100 g de vinaigre, on trouve $m = 8{,}0$ g, donc l'inscription sur l'étiquette est validée.

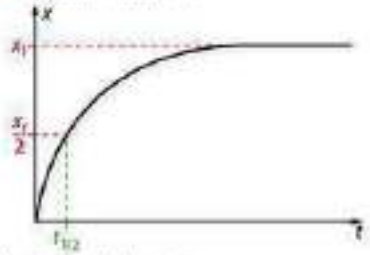
Chapitre 4

1 B. 2 A. 3 B. 4 B. 5 B et C.
6 A. 7 C. 8 A. 9 A et C.
10 A et B.

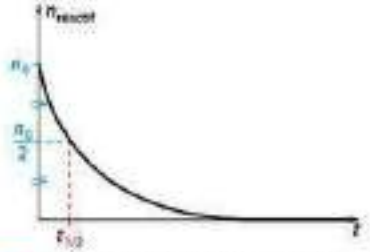
12 1. Il se forme un gaz au cours de la transformation.
2. La concentration en réactifs.
3. A 1 ; B 2 ; C 3.

13 1. Ces éléments accélèrent la réaction sans apparaître dans le bilan réactionnel.
2. Co^{2+} : catalyse homogène.
Zinc, fer et cuivre : catalyse hétérogène.
3. La réaction de décomposition de l'eau de Javel serait accélérée.

17 1. Durée au bout de laquelle l'avancement de la réaction vaut la moitié de l'avancement final.
2. a. Faux. b. Faux. c. Faux.
d. Vrai. e. Vrai si la réaction est totale ET que le nombre stœchiométrique devant le réactif limitant vaut 1.
3. D'après la relation c :



D'après la relation e :



18 1. Une réaction est d'ordre 1 par rapport à un réactif A si la vitesse volumique d'apparition des produits ou la vitesse volumique de disparition du réactif A sont proportionnelles à la concentration en quantité de matière du réactif A.
2. a. $v_{OCN^-} = k \cdot [\text{urée}]$; $v_{NH_4^+} = k' \cdot [\text{urée}]$; $v_{urée} = k'' \cdot [\text{urée}]$.
b. A faux ; B juste ; C faux ; D faux.
c. A $-v_{urée}([\text{urée}])$; C $[NH_4^+](t)$; D $[\text{urée}](t)$.

22 1. a. Il est formé puis consommé.
b. Il est consommé puis régénéré.
2. a. et 3.



COUPS DE POUCE

Chapitre 1

3. Établir les représentations de Lewis des espèces conjuguées de l'acide méthanoïque et de la N-méthylméthanamine. Ensuite, rédiger une règle générale pour répondre à la problématique.

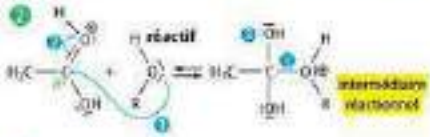
Chapitre 2

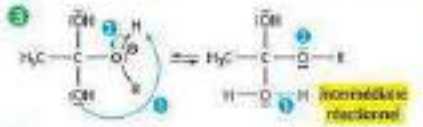
3. Attribuer les pics d'absorption, caractéristiques des spectres IR, à chacune des deux molécules concernées.

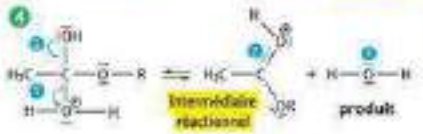
Chapitre 3

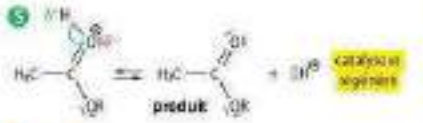
3. À quoi correspond le point particulier du graphique, correspondant aux mesures de conductivité réalisées ?

Si besoin, voir coup de pouce, p. 597.

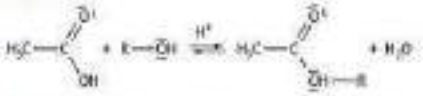








2. b.

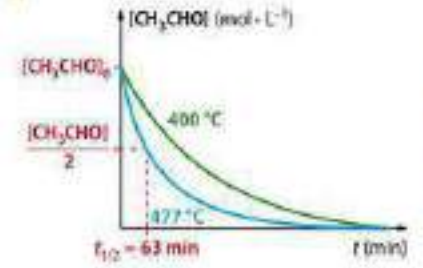


c. La température et la concentration des réactifs sont des facteurs cinétiques. Leur augmentation entraîne une augmentation de la fréquence des chocs efficaces entre entités, donc une diminution de la durée de la transformation.

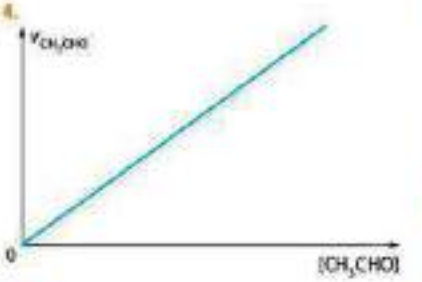
24 1. La réaction étudiée met en jeu des gaz.

2. Durée au bout de laquelle l'avancement de la réaction vaut la moitié de l'avancement final. $t_{1/2} = 63$ min.

3.

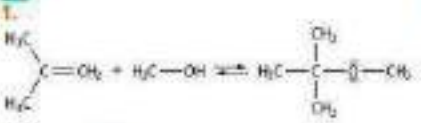


4.



26

1.



2. **Étape 1**

Double liaison C=C : site donneur.

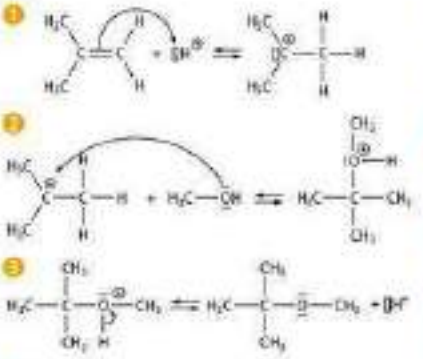
H^+ : site accepteur de doublet d'électrons.

Étape 2

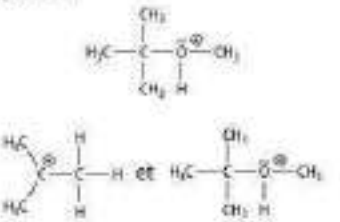
Doublets non liants de l'oxygène : sites donneurs.

C^+ : site accepteur de doublet d'électrons.

3.



4. Espèce **A** :



5. H^+ est un catalyseur.

27 1. a. On a : $n(C_3H_6O) = 5x$, donc

$$[C_3H_6O\,(aq)] = \frac{n(C_3H_6O)}{V} = \frac{5x}{V}.$$

b. On a :

$$v_{C_3H_6O} = \frac{d[C_3H_6O\,(aq)]}{dt} = \frac{d\left(\frac{5x}{V}\right)}{dt} = \frac{5}{V} \cdot \frac{dx}{dt},$$

car V est constant.

2. a. La vitesse volumique d'apparition de la propanone est proportionnelle à la dérivée temporelle de l'avancement, elle est donc proportionnelle à la pente de la tangente à la courbe $x(t)$. La pente de la tangente à la courbe $x(t)$ diminue au cours du temps, donc la vitesse volumique d'apparition de la propanone diminue au cours du temps.

b. Au cours de la réaction, il y a de moins en moins de réactifs. La concentration des réactifs est le facteur cinétique expliquant cette évolution.

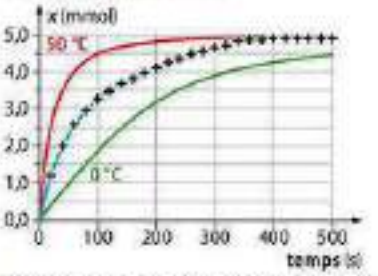
3. On a : $x(t_{1/2}) = \frac{x_f}{2}$. D'après le graphique, $t_{1/2}$ vaut environ 2,8 minutes.

28 1. a. $n(H_3O^+) = n_0(H_3O^+) - 2x$.

b. $v_{H_3O^+} = \frac{2}{V} \cdot \frac{dx}{dt}$.

2. a. La vitesse volumique de disparition des ions oxonium diminue au cours du temps.

b. Lorsque la température varie, l'avancement final reste le même.



c. Si la température augmente, l'agitation thermique augmente, les chocs efficaces sont plus fréquents.

3. a. Durée au bout de laquelle l'avancement vaut la moitié de l'avancement final.

b. $t_{1/2} = 55$ s.

29 1. Il apporte les ions H_3O^+.

2. a. $5\,H_2O_2\,(aq) + C_4H_4O_6^{2-}\,(aq) + 2\,H_3O^+\,(aq) \rightarrow 4\,CO_2\,(g) + 10\,H_2O\,(\ell)$

b. Co^{2+} est un catalyseur.

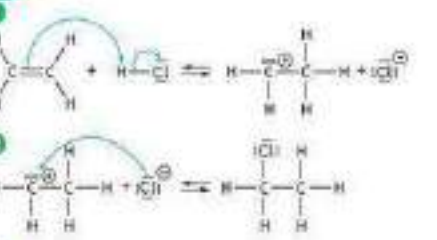
Co^{3+} est un intermédiaire réactionnel.

d. La solution est rosée.

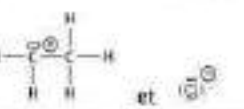
e. La solution est verdâtre.

f. Les ions Co^{3+} sont colorés. Il faudra régler le spectrophotomètre au λ_{max} du Co^{3+}.

33 1.



2.



3. $H_2C{=}CH_2 + H{-}Cl \rightleftarrows H_3C{-}CH_2Cl$

37 1. Le réactif et le produit sont des gaz.

2. a. Durée au bout de laquelle l'avancement vaut la moitié de l'avancement final.

b. La durée d'une transformation et le temps de demi-réaction évoluent dans le même sens.

Synthèse : le facteur cinétique mis en évidence est la concentration en réactifs. En effet, plus la concentration initiale en réactif est élevée, plus le temps de demi-réaction est faible, donc plus la transformation est rapide. Au niveau microscopique, une augmentation de la concentration en réactifs induit une

augmentation de la fréquence des chocs efficaces entre les réactifs, donc une augmentation de la vitesse de la transformation.

Chapitre 5

1 A et C. **2** A et B. **3** B. **4** B.
5 A. **6** A et C. **7** B et C.
8 B. **9** A et B. **10** A et B. **11** A et C.
12 A et B. **13** A et C.

15 1. Conservation de la charge et du nombre de nucléons.
2. a. Oui. b. Non. c. Non. d. Non.

17 1. Conservation de la charge et du nombre de nucléons.
2. a. et b. Pour β^-, un électron $^0_{-1}e$ et pour β^+, un positon $^0_{1}e$.
3. $^{108}_{47}Ag \rightarrow {}^{108}_{48}Cd + {}^{0}_{-1}e$
$^{106}_{47}Ag \rightarrow {}^{108}_{46}Pd + {}^{0}_{1}e$

20 1. $\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda \cdot N(t)$: équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants.
Sa résolution donne $N(t) = K \cdot e^{-\lambda \cdot t}$.
Comme à $t = 0$ s, $N(0) = N_0$ alors $K = N_0$ et $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$.
2. a. La durée au bout de laquelle la moitié des noyaux radioactifs initialement présents dans un échantillon se sont désintégrés.
b. $t_{1/2} = 5{,}7 \times 10^3$ ans.
c. Carbone 14.
3. a. $N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t_{1/2}}$
soit : $\frac{1}{2} = e^{-\lambda \cdot t_{1/2}}$ $\ln\frac{1}{2} = \ln\left(e^{-\lambda \cdot t_{1/2}}\right)$
$\ln 1 - \ln 2 = -\lambda \cdot t_{1/2}$ donc $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$.
b. $\lambda = 3{,}9 \times 10^{-12}\ s^{-1}$.

23 1. Le bois mort ne renouvelle plus son carbone 14, dont son activité diminue au cours du temps. Elle est plus faible que celle d'un bois vivant.
2. a. $t = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln\frac{A_0}{A(t)}$. $t = 1{,}03 \times 10^3$ ans.
b. L'année 953.

24 1. Les rayonnements gamma.
2. Le rayonnement alpha est constitué de noyaux d'hélium (2 protons et 2 neutrons), particules lourdes par rapport aux autres (électron, positon, etc.).

26 1. $^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + {}^{0}_{-1}e$
2. Le nombre de désintégrations par seconde, en Bq.
3. $t = 1{,}10 \times 10^3$ ans.
4. Environ en l'an 889.

28 1. $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$.
2. Durée au bout de laquelle la moitié des noyaux initialement présents se sont désintégrés.
3. Plomb 214 : $t_{1/2} = 27$ min.
Bismuth 214 : $t_{1/2} = 20$ min.
$t_{1/2}$ (plomb) > $t_{1/2}$ (bismuth).
4. $\lambda_{bismuth} > \lambda_{plomb}$.

29 1. L'aluminium a capté les deux protons de l'hélium et a expulsé un neutron selon l'équation : $^{27}_{13}Al + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{30}_{15}P + {}^{1}_{0}n$
2. Non, car cette transformation est provoquée par le bombardement des particules alpha sur l'aluminium.
3. Le phosphore 30 produit est radioactif et comme il n'existe pas dans la nature, on a donc produit un élément radioactif artificiel.

30 1. Conservation du nombre de charges et du nombre de nucléons.
2. $^{99}_{42}Mo + {}^{2}_{1}H \rightarrow {}^{97}_{43}Tc + {}^{1}_{0}n$
la particule libérée est un neutron.
3. $^{99}_{42}Mo \rightarrow {}^{97}_{43}Tc + {}^{0}_{-1}e$
donc radioactivité β^-.
4. Durée au bout de laquelle la moitié des noyaux initialement présents ont subi une désintégration.
5. a. Les éléments radioactifs sont utilisés pour l'imagerie médicale (comme traceurs dans la scintigraphie par exemple) et pour le traitement thérapeutique (dans la radiothérapie par exemple).
b. Le temps d'irradiation du patient est réduit.

31 1. Origine artificielle pour Litvinenko.
Origine naturelle pour Marie Curie.
2. $A = 1{,}66 \times 10^9$ Bq.
3. $t_{1/2} = 138{,}4$ j.

33 1. Graphiquement à 50 %, l'épaisseur de plomb est d'environ 0,4 mm.
2. La totalité des rayonnements γ est neutralisée.

41 1. a. $^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}X$
radioactivité α.
b. C'est le noyau de radon qui émet ce rayonnement γ car ce noyau a été formé dans un état excité.
2. a. $^{30}_{15}P \rightarrow {}^{30}_{14}Si + {}^{0}_{1}e$
b. Le noyau de silicium 30 étant obtenu directement dans l'état fondamental, il n'y a pas d'émission de rayonnement.
3. $t = 2\ t_{1/2} = 3{,}16 \times 10^3$ années.
Synthèse : la radioactivité naturelle correspond à la désintégration spontanée de noyaux qui existent à l'état naturel. La radioactivité artificielle correspond à la désintégration spontanée de noyaux qui n'existent pas à l'état naturel mais qui ont été synthétisés.

Chapitre 6

1 A et C. **2** C. **3** B.
4 A. **5** A. **6** B. **7** B. **8** A et B.
9 B et C. **10** C. **11** B et C. **12** C.

13 a. c. d. : non totale.
b. e. : totale.

17 1. Tableau d'avancement : voir page 604.
2. $x_f = 1{,}26 \times 10^{-3}$ mol ; $x_{max} = 0{,}15$ mol.
3. $\tau = 0{,}0084$ 4. Oui. 5. Non, car $\tau < 1$.

19 e. $Q_r = \frac{1}{\left[Ag^+(aq)\right] \cdot \left[Cl^-(aq)\right]}$
b. $Q_r = \frac{\left[HCO_2^-(aq)\right] \cdot \left[H_3O^+(aq)\right]}{\left[HCO_2H(aq)\right]}$
c. $Q_r = \left[Ba^{2+}(aq)\right] \cdot \left[SO_4^{2-}(aq)\right]$
d. $Q_r = \frac{\left[Al^{3+}(aq)\right]^2}{\left[Zn^{2+}(aq)\right]^3}$
e. $Q_r = \left[SO_4^{2-}(aq)\right] \cdot \left[H_3O^+(aq)\right]^2$
f. $Q_r = \frac{\left[Fe^{2+}(aq)\right]^2 \cdot \left[S_4O_6^{2-}(aq)\right]}{\left[Fe^{3+}(aq)\right]^2 \cdot \left[S_2O_3^{2-}(aq)\right]^2}$

21 1. $Q_{r,1} = 1{,}00$; $Q_{r,2} = 0{,}630$; $Q_{r,3} = 0{,}180$.
2. Le système **2** est à l'équilibre car $Q_{r,2} = K(T)$.

22 1. $K(T) = \frac{\left[Fe^{2+}(aq)\right]_f^2 \cdot \left[I_2(aq)\right]_f}{\left[Fe^{3+}(aq)\right]_f^2 \cdot \left[I^-(aq)\right]_f^2}$
2. $Q_{r,1} = 4{,}1 \times 10^5 > K(T)$: sens opposé.
$Q_{r,2} = 5{,}0 \times 10^{-4} = K(T)$: équilibre.
$Q_{r,3} = 3{,}6 \times 10^{-3} < K(T)$: sens direct.

24 Le schéma **B** est correct.
Schéma **A** : il manque le pont salin.
Schéma **C** : les demi-piles ne sont pas constituées de couples oxydant-réducteur.

26 1. $Cd(s) \rightleftarrows Cd^{2+}(aq) + 2\ e^-$
$Ag^+(aq) + e^- \rightleftarrows Ag(s)$ $\times 2$
$Cd(s) + 2\ Ag^+(aq) \rightarrow Cd^{2+}(aq) + 2Ag(s)$
2. Tableau d'avancement : voir page 604.
Ag^+ est le réactif limitant.
3. $q_{max} = 3{,}6 \times 10^3$ C.

29 1. Tableau d'avancement : voir page 604.
2. $Q_c = \frac{n_A \cdot n_{eau}}{n_{acide} \cdot n_{alcool}} = 5{,}5 \times 10^{-8}$.
3. L'état d'équilibre n'est pas atteint et le système évolue dans le sens direct.
4. $\tau = 0{,}01 = 1\ \%$. $\tau < 100\ \%$ donc la transformation n'est pas totale.

31 1. Même schéma que celui page 151 avec Al^{3+} / Al à la place de Ag^+ / Ag et la borne COM reliée à l'électrode d'aluminium.
2. a. $Ni^{2+}(aq) + 2\ e^- \rightleftarrows Ni(s)$
$Al(s) \rightleftarrows Al^{3+}(aq) + 3\ e^-$
b. $3\ Ni^{2+}(aq) + 2\ Al(s) \rightleftarrows 3\ Ni(s) + 2\ Al^{3+}(aq)$
c. De l'électrode Al vers l'électrode Ni.
d. De l'électrode Ni (borne +) vers l'électrode Al (borne −).
3. $q_{max} = 1{,}6 \times 10^5$ C.

32 1. « Dynamique » et pas « statique » car à l'état d'équilibre, il continue de se produire deux phénomènes (réaction directe et opposée) qui se compensent.
2. $Q_r = \left[Na^+(aq)\right] \cdot \left[Cl^-(aq)\right] = 0{,}50^2 = 0{,}25$
3. $Q_r < K(T)$, le système n'est pas à l'équilibre, il évolue dans le sens direct.

34 Transformation **A**
1. Tableau d'avancement : voir page 604.
2. $x_f = 0{,}114$ mol ; $x_{max} = 0{,}20$ mol.
$\tau = 0{,}57 = 57\ \%$.
3. Oui, car la réaction n'est pas totale.
Transformation **C**
1. Tableau d'avancement : voir page 604.
2. $x_f = 0{,}15$ mol ; $x_{max} = 0{,}15$ mol.
$\tau = 1{,}0 = 100\ \%$.
3. Non, car la réaction est totale.

COUP DE POUCE

Chapitre 3

3. Donner la relation entre les quantités de matière des réactifs titrant et titré à l'équivalence.

45 1. $2\ MnO_2\ (s) + Zn\ (s) + 2\ H_2O\ (\ell) \rightarrow 2\ MnO(OH)\ (s) + 2\ HO^-\ (aq) + Zn^{2+}(aq)$
2. $m_{min} = 8{,}2$ g.
Synthèse : $q_{max} = 2{,}5 \times 10^3$ mA · h, valeur cohérente avec l'indication du fabricant.

Chapitre 7

1 B. **2** B et C. **3** A et B. **4** B et C. **5** C. **6** A, B et C. **7** B et C. **8** A et C.

10 1. $NH_4^+\ (aq) + H_2O\ (\ell) \rightleftarrows NH_3\ (aq) + H_3O^+\ (aq)$
2. $K_A = \dfrac{[NH_3\ (aq)]_f \cdot [H_3O^+\ (aq)]_f}{[NH_4^+\ (aq)]_f}$.
3. $K_A = 6{,}3 \times 10^{-10}$.

13 1. a. L'ion méthanoate HCO_2^-.
b. Un acide faible ne réagit pas totalement avec l'eau : la transformation conduit à un équilibre chimique.
2. $HCO_2H\ (aq) + H_2O\ (\ell) \rightleftarrows HCO_2^-\ (aq) + H_3O^+\ (aq)$
3. Constante d'acidité K_A :
$K_A = \dfrac{[HCO_2^-\ (aq)]_f \cdot [H_3O^+(aq)]_f}{[HCO_2H(aq)]_f}$

15 1. La transformation avec l'eau étant totale, une solution aqueuse d'acide nitrique ne contient pas de molécules d'acide nitrique HNO_3.
2. $[NO_3^-\ (aq)]_i = [H_3O^+\ (aq)]_f = c$
$c = 5{,}0 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1}.
3. pH = 2,3.

21 1.


2. Si pH = 7,0, c'est la base conjuguée A^- qui prédomine.
Si pH = 1,5, c'est la forme acide AH qui prédomine.

23 1. Le pH d'une solution tampon varie peu lors d'une dilution.
2. Le pH d'une solution tampon varie peu par addition modérée d'acide ou de base.
3. De nombreux milieux biologiques, dont le sang, ont des pH compris entre 6 et 8.

26 1. $C_7H_6O_2\ (aq) + H_2O\ (\ell) \rightleftarrows C_7H_5O_2^-\ (aq) + H_3O^+\ (aq)$
$x_{max} = c \cdot V$ donc $c = \dfrac{x_{max}}{V}$.
$\tau = \dfrac{x_f}{x_{max}}$ donc $x_f = x_{max} \cdot \tau$.
$[C_7H_5O_2^-\ (aq)]_f = c \cdot \tau$
$[C_7H_6O_2\ (aq)]_f = c \cdot (1 - \tau)$
2. $c \cdot \tau^2 + K_A \cdot \tau - K_A = 0$
3. $\tau = \dfrac{-K_A + \sqrt{\Gamma}}{2c} = 0{,}16$ soit 16 %.
4. $[C_7H_5O_2^-\ (aq)]_f = 3{,}2 \times 10^{-4}$ mol · L^{-1}.
$[C_7H_6O_2\ (aq)]_f = 1{,}7 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1}.

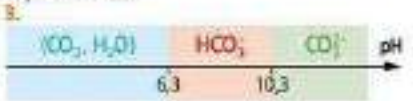
28 1. $pK_A = 4{,}9$.
2. a. Par lecture graphique, on a : 7 % de $C_{10}H_{20}O_2\ (aq)$ et 93 % de $C_{10}H_{19}O_2^-\ (aq)$.
b. $[C_{10}H_{20}O_2\ (aq)]_f = 1 \times 10^{-3}$ mol · L^{-1}.
$[C_{10}H_{19}O_2^-\ (aq)]_f = 1{,}4 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}.

29 1. $[H_3O^+\ (aq)] = \dfrac{x_f}{V} = \dfrac{x_{max} \cdot \tau}{V} = c \cdot \tau$.
$pH = -\log[H_3O^+(aq)] = 2{,}9$
2. L'équation s'écrit :
$AH\ (aq) + H_2O\ (\ell) \rightleftarrows A^-\ (aq) + H_3O^+\ (aq)$
L'avancement maximal est $x_{max} = c \cdot V$, donc $c = \dfrac{x_{max}}{V}$.
Le taux d'avancement final est $\tau = \dfrac{x_f}{x_{max}}$, donc $x_f = x_{max} \cdot \tau$.
$[A^-\ (aq)]_f = [H_3O^+]_f = \dfrac{x_f}{V} = \dfrac{x_{max} \cdot \tau}{V} = c \cdot \tau$
$[AH\ (aq)]_f = \dfrac{c \cdot V - x_f}{V} = \dfrac{x_{max} - x_{max} \cdot \tau}{V}$
$[AH\ (aq)]_f = \dfrac{x_{max} \cdot (1 - \tau)}{V} = c \cdot (1 - \tau)$
La constante d'acidité K_A du couple s'écrit donc : $K_A = \dfrac{(c \cdot \tau)^2}{c \cdot (1 - \tau)}$.
3. $K_A = 1{,}9 \times 10^{-4}$ d'où $pK_A = 3{,}7$, valeur proche de la valeur de référence.

30 1. a. $2\ H_2O\ (\ell) \rightleftarrows H_3O^+\ (aq) + HO^-\ (aq)$
$K_e = [H_3O^+\ (aq)]_f \cdot [HO^-\ (aq)]_f$
b. pH = 7,0.
2. a. $CO_2\ (aq), H_2O\ (\ell) + H_2O\ (\ell) \rightleftarrows HCO_3^-\ (aq) + H_3O^+\ (aq)$
b. À pH = 5,7, on lit graphiquement que le pourcentage d'ions carbonate $CO_3^{2-}\ (aq)$ est nul. On peut donc négliger la réaction entre les ions carbonate $CO_3^{2-}\ (aq)$ et l'eau dans de l'eau distillée.
c. Le dioxyde carbone présent dans l'air se dissout dans l'eau distillée. Celui-ci possède des propriétés acides et réagit donc avec l'eau pour former des ions oxonium : le pH diminue.

34 1. $pK_A = 4{,}8$.
2. Une solution tampon est une solution dont le pH varie peu par addition d'une petite quantité d'acide ou de base, et par dilution modérée.
3. $n = 1{,}0 \times 10^{-2}$ mol et
$[HO^-\ (aq)]_f = 1{,}0 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}
d'où $[H_3O^+\ (aq)]_f = 1{,}0 \times 10^{-2}$ mol · L^{-1}
et pH = 12,0. Le pH de l'eau varie beaucoup (de 7,0 à 12,0) : l'eau pure n'est pas une solution tampon.

37 1. Le rouge du crésol dont la zone de virage contient la valeur du pH à l'équivalence (environ 8,5 lue graphiquement).
2. a. La méthode des tangentes donne $V_E = 8{,}4$ mL.
À l'équivalence, le réactif titré AH_2 et le réactif titrant HO^- ont été introduits dans les proportions stœchiométriques de l'équation de titrage : $\dfrac{n(AH_2)_{introduite}}{1} = \dfrac{n(HO^-)_{versée}}{2}$,
$\dfrac{n(AH_2)_{introduite}}{n(AH_2)} = \dfrac{C_B \cdot V_E}{2}$
donc $n(AH_2)_{introduite} = \dfrac{C_B \cdot V_E \cdot M(AH_2)}{2}$
$m(AH_2)_{introduite} = 4{,}9 \times 10^{-2}$ g.
Cependant, on a titré une prise d'essai de 10,0 mL issue d'une solution de 100,0 mL dans laquelle la gélule avait été dissoute, donc $m_{exp} = 10 \times m(AH_2)_{introduite} = 0{,}49$ g.
$u_{max\,exp} = 0{,}017$ g = 0,02 g.
$m_{exp} = (0{,}49 \pm 0{,}02)$ g.
b. $\dfrac{|m_{exp} - m_{lab}|}{u_{m_{exp}}} = 0{,}50$, valeur inférieure à 1, donc la valeur déterminée expérimentalement correspond aux incertitudes près à la valeur donnée par le fabricant.

42 1. $CO_2\ (aq), H_2O\ (\ell) + H_2O\ (\ell) \rightleftarrows HCO_3^-\ (aq) + H_3O^+\ (aq)$
2. Lorsque l'on injecte du dioxyde de carbone dans l'eau, il s'y dissout en partie et l'équilibre chimique précédent s'y établit. La concentration en ions oxonium augmente, le pH diminue.
3.


L'espèce prédominante est donc l'ion hydrogénocarbonate le matin (pH = 6,7) et le soir (pH = 7,5).
Synthèse : si le pH augmente au cours de la journée, $[H_3O^+]_f$ diminue.
$K_A = \dfrac{[HCO_3^-]_f \cdot [H_3O^+]_f}{[(CO_2, H_2O)]_f}$ est une constante. Si le numérateur $[H_3O^+]_f \cdot [HCO_3^-]_f$ diminue, $[HCO_3^-]_f$ variant dans les mêmes proportions que $[H_3O^+]_f$, le dénominateur $[CO_2, H_2O]_f$ diminue : les plantes consomment donc plus de dioxyde de carbone qu'elles n'en produisent.
Réguler le pH consiste à éviter cette hausse liée à la diminution de la concentration en dioxyde de carbone dissout. On peut donc en injecter, au moins dans la journée comme le précise le document 2, afin de compenser la consommation des plantes.

Chapitre 8

1 C. **2** A. **3** B. **4** A. **5** B. **6** C. **7** C. **8** B. **9** B. **10** A.

12 1. Réaction 1.
2. a. $Cu^{2+}\ (aq) + 2\ Ag\ (s) \rightleftarrows Cu\ (s) + 2\ Ag^+\ (aq)$
b. La solution va se décolorer et on aura formation d'un dépôt métallique orangé de cuivre sur la cathode (électrode reliée à la borne − du générateur).

16 1. $2\ Cl^-\ (aq) = Cl_2\ (aq) + 2\ e^-$
Elle se produit à l'anode.
2. $q = 3{,}9 \times 10^9$ C.
3. $n(e^-) = 4{,}0 \times 10^4$ mol.
4. $n(Cl_2) = 2{,}0 \times 10^4$ mol.
5. $V(Cl_2) = 4{,}8 \times 10^5$ L = 480 m^3.

17 1. La pile à combustible convertit l'énergie chimique en énergie électrique.

2. Les panneaux photovoltaïques permettent d'avoir de l'électricité durant une journée ensoleillée. Le surplus d'énergie électrique dans la journée a permis de fabriquer du dihydrogène grâce à l'électrolyseur que l'on stocke dans une citerne. Quand il ne fait pas beau ou la nuit, la pile à combustible alimentée par le dihydrogène stocké permet d'avoir de l'électricité. De plus, sans polluer.
3. Ce dispositif permet de produire de l'énergie propre (sans déchet radioactif et sans émission de gaz à effet de serre) et de pouvoir stocker le surplus d'énergie.

19 1. Le titane est réduit, donc il se trouve à la cathode.
2. $n(e^-) = 7{,}5 \times 10^{-3}$ mol.
3. $n(Ti) = 3{,}7 \times 10^{-3}$ mol.
4. $Ti^{n+}(aq) + n\,e^- = Ti(s)$
$n = 2$ donc $Ti^{2+}(aq)$.

21 1. a. Le canon sert de cathode car il est le siège d'une réduction.
b. $2\,H_2O(\ell) + 2\,e^- = H_2(g) + 2\,HO^-(aq)$
2. $n(e^-) = 0{,}11$ mol.
3. $n(H_2) = 5{,}5 \times 10^{-2}$ mol. $V(H_2) = 1{,}3$ L.

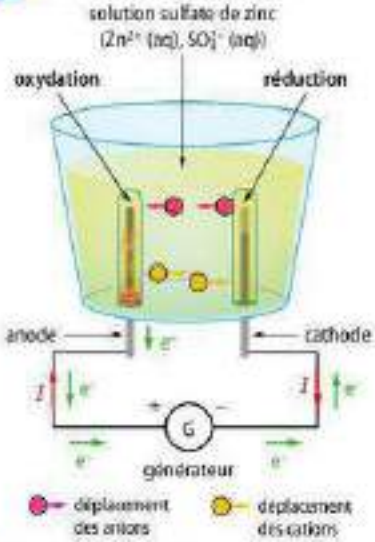
22 1. $[Cu^{2+}(aq)]_i = \dfrac{c_1 \cdot V_1}{V_T} = \dfrac{0{,}10 \times 0{,}050}{0{,}100}$
$= 0{,}05$ mol · L^{-1}
$[Zn^{2+}(aq)]_i = \dfrac{c_2 \cdot V_2}{V_T} = \dfrac{0{,}10 \times 0{,}050}{0{,}100}$
$= 0{,}05$ mol · L^{-1}
Le quotient de réaction à l'état initial est :
$Q_{r,i} = \dfrac{[Zn^{2+}]_i}{[Cu^{2+}]_i}$ soit $Q_{r,i} = 1$.
$Q_{r,i} < K$ donc l'évolution du système se fait dans le sens direct de l'équation donnée.
2. Si l'on force la transformation grâce à un générateur, elle se fera dans le sens opposé de l'équation donnée, donc on formera du zinc.
3. La quantité de charges électriques mise en jeu est : $q = I \cdot \Delta t = 0{,}200 \times 30 \times 60 = 360$ C.
4. D'après la demi-équation :
$Zn^{2+}(aq) + 2\,e^- = Zn(s)$, on a :
$n(Zn) = \dfrac{1}{2} n(e^-)$
avec $n(e^-) = \dfrac{q}{N_A \cdot e}$, donc $n(Zn) = \dfrac{q}{2 \times N_A \cdot e}$
$n(Zn) = \dfrac{360}{2 \times 6{,}02 \times 10^{23} \times 1{,}6 \times 10^{-19}}$
soit $n(Zn) = 1{,}9 \times 10^{-3}$ mol.
La masse de zinc formé est :
$m(Zn) = n(Zn) \cdot M_{Zn} = 1{,}9 \times 10^{-3} \times 65{,}4$ soit
$m(Zn) = 0{,}12$ g.

24 1. Cette pile ne rejette que de l'eau, donc elle ne pollue pas.
2. $H_2(g) = 2\,H^+(aq) + 2\,e^-$
$O_2(g) + 4\,H^+(aq) + 4\,e^- = 2\,H_2O(\ell)$
3. $n(e^-) = 2\,n(H_2)$.
4. Le dioxygène provient de l'air qui est en quantité illimité.
5. $n(H_2) = \dfrac{I \cdot \Delta t}{2\,N_A \cdot e}$. 6. $V(H_2) = 1{,}8 \times 10^4$ L.
7. Il faudrait un énorme réservoir pour le stocker.

25 Démarche avancée
1. $2\,H_2O(\ell) = O_2(g) + 4\,H^+(aq) + 4\,e^-$
$2\,H_2O(\ell) + 2\,e^- = H_2(g) + 2\,HO^-(aq)$
Donc : $2\,H_2O(\ell) \rightleftarrows O_2(g) + 2\,H_2(g)$
2. $n(O_2) = 17{,}3$ mol par jour.
3. $n(e^-) = 69$ mol.
4. $q = 6{,}7 \times 10^6$ C. 5. $I = 78$ A.

27 1. $m(Sn) = 3{,}4 \times 10^{-2}$ g. 2. $\Delta t = 9{,}2$ s.

32 1. Schéma :



2. $Zn(s) = Zn^{2+}(aq) + 2\,e^-$
$Zn^{2+}(aq) + 2\,e^- = Zn(s)$
3. La cathode.

Synthèse :
En un mois : $n(Zn) = 0{,}80$ mol. D'après la demi-équation $Zn^{2+}(aq) + 2\,e^- = Zn(s)$, on a : $n(e^-) = 2\,n(Zn) = 1{,}6$ mol.
La quantité de charges électriques consommées mensuellement par l'électrolyseur est : $q = n(e^-) \cdot N_A \cdot e = 1{,}5 \times 10^5$ C.
1 A · h = 3 600 C donc $q = 41{,}7$ A · h. Cette valeur correspond à 10 % de la consommation totale, donc la quantité de charges électriques consommées par l'abonné correspond aux 90 % restants, soit $q = \dfrac{90 \times 41{,}7}{10}$
$q = 375$ A · h.

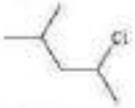
Chapitre 9

1 A. **2** A et B. **3** A. **4** A et C.
5 B et C. **6** A. **7** A et C. **8** A.

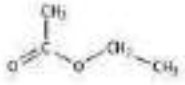
10 1. a. Éthanoate d'éthyle



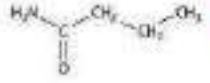
b. 4-méthyl-2-chloropentane



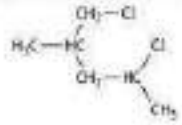
c. 4-méthyl-pentan-3-amine



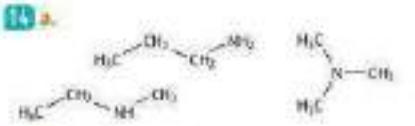
2. a. Éthanoate d'éthyle
b. Butanamide



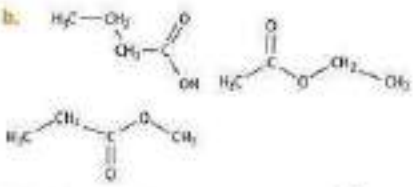
c. 2-méthyl-1,4-dichloropentane



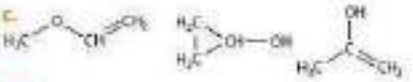
14 a.



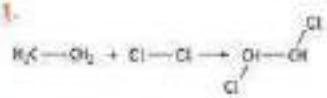
b.



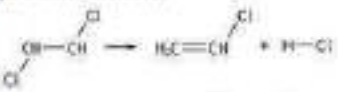
c.



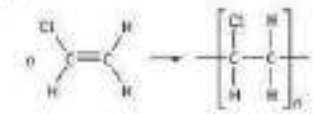
15 1.



2. 1,2-dichloroéthane.
3.



4.



5. Car ce type de composé est constitué par l'addition de « n » molécules de chlorure de vinyle, le monomère de ce polymère.

17 1. A et B.
2. Quel que soit le montage utilisé, il convient que la température d'ébullition d'un des produits de la synthèse envisagée soit plus basse que celles des réactifs, on peut dès lors l'éliminer, donc déplacer l'équilibre chimique dans le sens de sa formation, qui correspond à l'épuisement des réactifs.

18 1. Augmenter la vitesse de réaction en évitant toute perte de matière.
2. L'acide sulfurique est un catalyseur de réaction.
3. n(alcool) = 0,20 mol et n(acide) = 1,0 mol. L'acide est introduit en excès ; dans ce cas, l'avancement final sera augmenté, donc le rendement sera supérieur à 67 %.

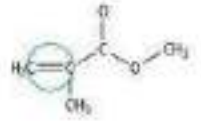
20 1. Étapes 1 et 2 : réactions d'addition. Étape 3 : réaction d'élimination.
2. Dans une addition, tous les atomes engagés dans les réactifs se retrouvent dans le produit recherché.
3. Deux étapes catalysées et utilisation d'un réactif renouvelable : le dioxygène.
4. On peut supposer que du fait des durées de chauffage, le coût énergétique est élevé.

21 1. Réactions de substitution.
2. a. L'action de l'acide nitrique sur l'aniline conduirait à la substitution de l'un des atomes

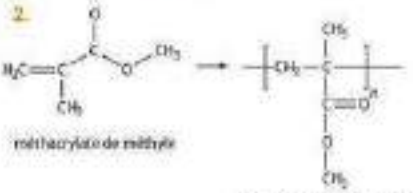
d'hydrogène du cycle par le groupe « nitro », et à la nitration du groupe « amino ».
b. Protection du groupe « amino » par une fonction « amide ».
c. Oui.
d. Déprotection de la fonction « amino ».

23 1. Améliorer le rendement de la réaction.
2. Substituer l'acide éthanoïque par de l'anhydride éthanoïque permet à cette réaction de devenir totale.
3. $R = 89\,\%$.

25 1.



2.



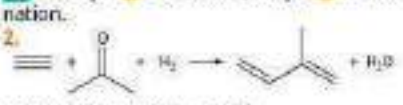
méthacrylate de méthyle — polyméthacrylate de méthyle

3. Un polyester.
4. Le PMMA est parfaitement recyclable. Il reste toutefois produit à partir de composés issus de la pétrochimie.

26 1. L'estérification est une addition : avec deux produits on n'en forme qu'un. L'estérification est plutôt une substitution car de l'eau est formée en plus de l'ester.
2. La vitesse de réaction est augmentée en chauffant le milieu réactionnel et en ajoutant dans ce milieu de l'acide sulfurique, un catalyseur.
3. Chauffer comme on peut le voir sur les courbes, permet d'augmenter la quantité d'ester formé donc le rendement. L'ester formé flest plus rapidement, mais pas en plus grande quantité. Le rendement demeure inchangé.

30 1. Le montage **B**.
2. Le choix du chauffage et l'introduction d'un catalyseur ont pour objet d'augmenter la vitesse de réaction. Le choix du montage à reflux est justifié par le souci d'éviter toute perte de matière.
3. $R = 67\,\%$.
4. Pour augmenter le rendement de cette synthèse, il convient d'éliminer l'un des produits de la réaction, en l'occurrence l'eau en la distillant simultanément à sa formation : on utilise donc le montage **A**.

36 1. Étape **1** : addition ; étape **2** : élimination.
2.



• M(isoprène) = 68 g · mol^{-1}.
n(isoprène) = 4,4 × 10^3 mol d'isoprène.
n(isoprène attendue) = 5,2 × 10^3 mol.
Relativement à la stœchiométrie de la réaction de synthèse n(acétone) = n(isoprène attendue).
V(acétone) = 3,8 × 10^4 m^3.

Chapitre 10

1 C. **2** B. **3** A. et C. **4** B. **5** C. **6** A. **7** C. **8** C. **9** B.

13 1. a. $\vec{v}\begin{pmatrix}3,39\\-9,8\times t+5,87\end{pmatrix}$
b. À $t = 1,0$ s : $\vec{v}\begin{pmatrix}3,39\\-3,93\end{pmatrix}$ $v = 5,19$ m · s^{-1}
2. a. $\vec{a}\begin{pmatrix}0\\-9,8\end{pmatrix}$
b. Vecteur constant, vertical et vers le bas.
c. $a = 9,8$ m · s^{-2}.

14 Mouvements : uniforme : B, C ; accéléré : E, A, D ; ralenti : F.

18 1. a. $\vec{v} = v\vec{\tau} + 0\vec{n}$. b. La composante sur $\vec{\tau}$ augmente et la composante sur $\vec{n}$ reste nulle.
2. a. $\vec{a} = \frac{dv}{dt}\vec{\tau} + \frac{v^2}{R}\vec{n}$
b. La composante sur $\vec{\tau}$ est constante et la composante sur $\vec{n}$ augmente.

22 1. Les vecteurs vitesse et accélération sont colinéaires et ont la même direction que la trajectoire.
2. a. Trajectoire rectiligne uniforme : $\vec{a} = \vec{0}$. Trajectoire circulaire uniforme : les vecteurs vitesse et accélération sont orthogonaux.
b. $\vec{v} \cdot \vec{a} = 0$

22 1. $\vec{v}(0) = \vec{0}$
2. a. Circulaire accéléré.
b. Circulaire ralenti. c. $T = 2$ s
3. a. $\vec{a}\begin{pmatrix}\pi\times L\cos(2\pi t)\\-\pi\times\sin^2(2\pi t)\\\hline 4\end{pmatrix}$
b. $\frac{dv}{dt} \neq 0$ donc le mouvement n'est pas uniforme.

31 1. $v = 2,2 - k \times t$. Ainsi, à $t = 0$, $v = 2,2$ m · s^{-1}. De plus, $a = -k$. Ainsi, $k = 4,9$ m · s^{-2}. Le signe négatif signifie que le vecteur accélération est dirigé vers le bas de la pente alors que Ambre a un mouvement vers le haut de la pente.
2. a. $t = 0,45$ s b. $d = 49$ cm
3. $t = 0,45$ s et $v = 2,2$ m · s^{-1}.

33 1. a. $v_M = 4,8$ m · s^{-1}
b. Le mouvement est circulaire uniforme.
2. $\vec{a}_M = -24\times\cos(5,0\times t)\vec{i} - 24\sin(5,0\times t)\vec{j}$
3. a. $\vec{v}_M = 4,8\vec{t}$ c. $\vec{a}_M = 24\vec{n}$
b. $v = 4,8$ m · s^{-1}. d. $R = 0,96$ m = 96 cm

Chapitre 11

1 B. **2** A, B et C. **3** B. **4** A. **5** B. et C. **6** A. et C. **7** A. et C. **8** B. et C. **9** C.

11 Le centre de masse est au centre du disque car c'est le point qui a la trajectoire la plus simple.

14 Le référentiel héliocentrique est galiléen pour l'étude du mouvement des planètes. Le référentiel géocentrique est galiléen pour des mouvements de quelques heures (satellite). Le référentiel terrestre est galiléen pour des mouvements de quelques minutes (voiture, fusée, sportif).

18 1. Le vecteur somme des forces est nul ($\sum\vec{F} = \vec{0}$) en **A** et correspond au vecteur bleu en **B**.



2. Le système **B** est alors à l'équilibre si et seulement si son vecteur vitesse $\vec{v} = \vec{0}$.
3. D'après la 2e loi de Newton ($\sum\vec{F} = m\vec{a}$) pour le système **B**, le vecteur accélération a la même direction et le même sens que le vecteur somme des forces.

20 1. $\vec{v} = \vec{0}$ et $\vec{a} = \vec{0}$.
2. 2e loi de Newton : $\sum\vec{F} = m\vec{a}$ donc $\sum\vec{F} = \vec{0}$.
3. $\vec{v} = \vec{0}$ et $\sum\vec{F} = \vec{0}$ la pinata est à l'équilibre.

22 1. Par construction graphique $\sum\vec{F}$ a une direction verticale et le sens est vers le bas.
2. Valeur du poids $P = m \cdot g = 90 \times 9,8 = 8,8 \cdot 10^2$ N et la longueur du vecteur $\vec{P}$ mesure 1,6 cm. Or par construction $\sum\vec{F}$ mesure 0,60 cm ce qui donne une valeur $\sum F = \frac{8,8\cdot10^2\times0,60}{1,6} = 3,3\cdot10^2$ N.
Or d'après la 2e Loi de Newton $\sum F = m \cdot a$ d'où $a = \frac{\sum F}{m} = \frac{3,3\cdot10^2}{90} = 3,6$ m · s^{-2}

25
1. $a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{0-10}{2,0} = -5,0$ m · s^{-2}
2. On utilise la 2e loi de Newton $\sum\vec{F} = m\vec{a}$.
3. La résultante des forces $\sum\vec{F}$ a donc la même direction et le même sens que le vecteur accélération $\vec{a}$ (horizontale et sens opposé au mouvement) et a une valeur de $\sum F = ma = 200 \times 5,0 = 1,0.10^3$ N.

29 1. Référentiel terrestre supposé galiléen.
2. Poids de la fusée $\vec{P}$, force de poussée moteurs $\vec{F}$, force de frottement de l'air $\vec{f}$.
3. Les frottements étant négligeables $\vec{F} + \vec{P} = M \cdot \vec{a}$ soit sur axe vertical $F - Mg = M \cdot a$ donc $a = \frac{F}{M} - g = \frac{3,3\times10^7}{2\,000\times10^3} - 10 =$ **6,5 m · s^{-2}**

30 1. Le vecteur accélération $\vec{a}$ a la direction de la pente, sens celui du mouvement et a une valeur :

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\left(\frac{72}{3,6}\right) - 0}{10} = 2,0\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$$

2. $\vec{P} + \vec{R} + \vec{F} = m \cdot \vec{a}_{G_1}$ projeté sur l'axe xx' : $-m \cdot g \cdot \sin\alpha + 0 + F = m \cdot a$ donc $F = m \cdot (a + g \cdot \sin\alpha)$
3. $F = 1,0\times10^3\times(2,0 + 9,8\times\sin(10)) = 3,7\cdot10^3$ N.
4. Frottements à ne pas négliger.

Chapitre 12

1 B. et C. **2** C. **3** A. **4** B. **5** B. et C. **6** A. et B. **7** A. et B. **8** A. et C.

COUP DE POUCE

Chapitre 10

Activité 1

Étudier l'évolution des vecteurs vitesse et accélération d'un projectile, c'est étudier l'évolution de leur caractéristiques (direction, sens, valeur) au cours du temps, soit par la construction graphique de ces vecteurs, soit par le calcul de leurs composantes au cours du temps. Condition d'analyse : repérer la position du centre de ce projectile à intervalle de temps régulier, ce que permet un enregistrement vidéo du mouvement dans le référentiel terrestre, exploité par un logiciel de pointage.

9 1. 2e loi de Newton, $\vec{a} = \vec{g}_0$

2. $\frac{dv_z}{dt} = g_0$, donc $v_z(t) = g_0 \times t$ car $v_z(0) = 0$.

Puis $z(t) = \frac{1}{2} \times g_0 \times t^2$

3. La trajectoire est selon (Oz) donc le mouvement est plan.

4. À l'impact $z(t_C) = h$ soit $t_C = \sqrt{\frac{2h}{g_0}}$ et $t_C = 0{,}452$ s.

5. $v_z(t_C) = g_0 \times t_C$ et $v_z(t_C) = 4{,}43\ m \cdot s^{-1}$.

12 1. En reportant $t = \frac{x}{v_0 \times \cos\alpha}$ dans $y(t)$,

$y(x) = \frac{-g_0}{2 \times v_0^2 \times \cos^2\alpha} \times x^2 + x \times \tan\alpha$.

2.



3. La flèche est atteinte pour $v_y(t_s) = 0$;

$t_s = \frac{v_0 \times \sin\alpha}{g_0}$ d'où $y(t_s) = \frac{v_0^2 \times \sin^2\alpha}{2g_0}$;

$y_{max} = 3{,}8$ m.

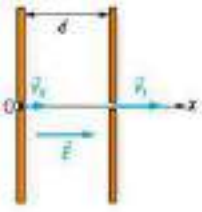
4. $y(t_p) = 0$ pour $t_p = \frac{2v_0 \times \sin\alpha}{g_0}$;

$x_{max} = x(t_p) = \frac{2v_0^2 \times \sin\alpha \times \cos\alpha}{g_0}$;

$x_{max} = 8{,}8$ m.

13 1. b 2. c 3. c 4. b et c

14 1. $v_f > v_0$ donc l'armature de sortie, chargée négativement, accélère le proton.



2. a. $\frac{F_e}{P} = 1{,}9 \times 10^{10}$

b. 2e loi de Newton :

$\vec{a} = \frac{e}{m} \times \vec{E}$.

3. a. $a_x = \frac{eE}{m}$ b. $v_x(t) = \frac{eE}{m} \times t + v_0$

et $x(t) = \frac{eE}{2m} \times t^2 + v_0 \times t$.

c. L'accélérateur est linéaire car le mouvement de la particule s'effectue selon (Ox).

4. a. Le proton sort pour $x(t_s) = d$ soit $\frac{eE}{2m} \times t_s^2 + v_0 \times t_s - d = 0$ et $t_s = 1{,}4 \times 10^{-6}$ s

b. $v_f = \frac{eE}{m} \times t_s + v_0$ soit $v_f = 2{,}6 \times 10^5\ m \cdot s^{-1}$.

Accélérateur de particule.

18 1. $\vec{v}_0$ perpendiculaire aux armatures et l'armature de sortie est de charge opposée à celle de la particule.



2. a. $E_{m}(I) = E_{m}(O)$

b. $v_f = \sqrt{v_0^2 - \frac{2eU_{AB}}{m}}$

et $v_f = 1{,}9 \times 10^7\ m \cdot s^{-1}$

3. a. $W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB} = -eU_{AB}$ avec $U_{AB} < 0$.

b. $\Delta E_c = E_{cB} - E_{cA} = W_{AB}(\vec{F})$

d'où $\frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = -eU_{AB}$

soit $v_f = \sqrt{v_0^2 - \frac{2eU_{AB}}{m}}$

20 1. D'après la 2e loi de Newton, $\vec{a} = \vec{g}_0$.

$$\vec{v}(t)\begin{cases} v_x(t) = v_0 \times \cos\alpha \\ v_y(t) = -g_0 \times t + v_0 \times \sin\alpha \end{cases}$$

et

$$\begin{cases} x(t) = v_0 \times \cos\alpha \times t \\ y(t) = -\frac{g_0}{2} \times t^2 + v_0 \times \sin\alpha \times t \end{cases}$$

2. Par substitution de $t = \frac{x}{v_0 \times \cos\alpha}$, on obtient l'équation.

3. Le ballon est récupéré au niveau du sol,

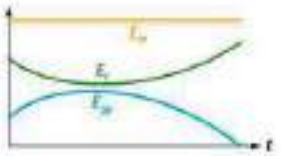
$y(t_f) = 0$ d'où $t_f = \frac{2v_0 \times \sin\alpha}{g_0}$ soit $t_f = 1{,}8$ s.

22 1. a. $\Delta E_c = \sum W_{AB}(\vec{F})$

b. $\Delta E_c = E_{cB} - E_{cA} = W_{AB}(\vec{P})$

$v_B = \sqrt{v_A^2 + 2g(z_A - z_B)}$ soit $v_B = 14\ m \cdot s^{-1}$.

2.



23 1. a. 2e loi de Newton, $\vec{a}(t) = \vec{g}$;

$v_z(t) = -g \times t + v_0$ car $v_z(0) = v_0$;

$z(t) = \frac{-g}{2} \times t^2 + v_0 \times t + h$ car à $t = 0$, $z(0) = h$.

b. $v_z(t)$ est une fonction affine décroissante, mouvement ralenti.

2. a. Au sommet, $v_z(t_s) = -g \times t_s + v_0 = 0$

d'où $t_s = \frac{v_0}{g}$ soit $t_s = 0{,}71$ s.

b. $h_{max} = z(t_s) = \frac{-g}{2} \times t_s^2 + v_0 \times t_s + h$

d'où $h_{max} = 4{,}0$ m.

25 1. D'après la 2e loi de Newton, $m \times \vec{a} = m \times \vec{g}_0$

d'où $\vec{a} = \vec{g}_0 = \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = -g_0 \\ a_z = 0 \end{cases}$

2. a. Dans le repère orthonormé $(T ; x, y, z)$.

Puisque $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$, par intégration, on en déduit un ensemble de primitives possibles :

$$\vec{v}(t)\begin{cases} v_x(t) = k_1 \\ v_y(t) = -g_0 \times t + k_2 \end{cases}$$

$\vec{v}(0) = \vec{v}_T$ d'où $\vec{v}(t)\begin{cases} v_x(t) = v_T \times \cos\alpha \\ v_y(t) = -g_0 \times t - v_T \times \sin\alpha \end{cases}$

De même, $\vec{v} = \frac{d\overrightarrow{TG}}{dt}$, les équations horaires de la position s'écrivent :

$$\overrightarrow{TG}(t)\begin{cases} x(t) = v_T \times \cos\alpha \times t \\ y(t) = -\frac{1}{2}g_0 \times t^2 - v_T \times \sin\alpha \times t \end{cases}$$

3. Par substitution de la variable $t = \frac{x}{v_T \times \cos\alpha}$ dans l'expression de $y(t)$:

$y(x) = -9{,}5 \times 10^{-3}x^2 - 1{,}9 \times 10^{-1}x$

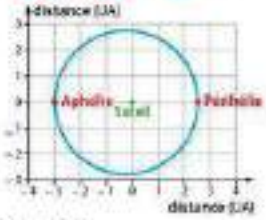
4. a. Le point L d'abscisse x_L appartient à la fois à la piste et à la trajectoire du sauteur. La piste a pour équation $y = -0{,}59x$ donne : $x_L \cdot (9{,}5 \times 10^{-3} \cdot x_L - 0{,}40) = 0$, soit $x_L = 42$ m

b. Abscisse du point d'atterrissage < abscisse réelle = 97 m dû aux frottements de l'air.

Chapitre 13

1 C. **2** B. **3** B. **4** C. **5** C.
6 B. **7** B. et C. **8** B. **9** A. **10** A.

14 La distance Cérès - Soleil n'est pas constante donc la trajectoire est une ellipse (1er loi de Kepler).
Orbite de Cérès autour du Soleil.



$a_c = \frac{4{,}47 \times 10^8 + 3{,}81 \times 10^8}{2} = 4{,}14 \times 10^8$ km

$T_c = \sqrt{\frac{a_c^2}{a^3}} \times T_T = \sqrt{\frac{(4{,}14 \times 10^8)^3}{(1{,}50 \times 10^8)^3}} \times 365{,}25$

$= 1{,}67 \times 10^3$ jours

19 1. **Référentiel Héliocentrique**

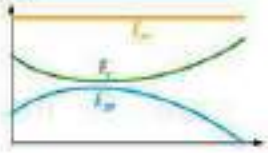
On a : $v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}}$ et $v = \frac{2\pi r}{T}$ donc $\left(\frac{2\pi r}{T}\right)^2 = \frac{G \cdot M}{r}$ ainsi $\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M}$.

Planète	a (m)	T (s)	$\frac{T^2}{r^3}$ (s^2/m^3)
Mercure	$5{,}805 \times 10^{10}$	7573824	$2{,}9324 \times 10^{-19}$
Vénus	$1{,}0845 \times 10^{11}$	19407024	$2{,}053 \times 10^{-19}$
Terre	$1{,}50 \times 10^{11}$	31557600	$2{,}9508 \times 10^{-19}$
Mars	$2{,}28 \times 10^{11}$	59328288	$2{,}9697 \times 10^{-19}$
Jupiter	$7{,}8 \times 10^{11}$	375535440	$2{,}9718 \times 10^{-19}$
Saturne	$1{,}4265 \times 10^{12}$	927793440	$2{,}9654 \times 10^{-19}$
Uranus	$2{,}88 \times 10^{12}$	2650638400	$2{,}9416 \times 10^{-19}$
Neptune	$4{,}5E \times 10^{12}$	5207004000	$2{,}9754 \times 10^{-19}$

$\frac{T^2}{r^3}$ = constante = 2,95 · 10⁻¹⁹ s²/m³

22 1. La carte est immobile donc les trajectoires sont représentées dans le référentiel terrestre.
2. Un point.

24 1. Le référentiel Neptunocentrique.
2. Les aires balayées sont égales pour des temps égaux, la distance parcourue des arcs de cercle sont égaux. La vitesse est donc constante.
3.



4. a.

$T^2 = 2\pi\sqrt{\frac{R_N^3}{G \cdot M_N}}$ = 5,9 jours

b.

$v = \frac{2\pi R_N}{T} = \frac{2\pi \times 3{,}55 \times 10^9}{5{,}1 \times 10^5} = 4{,}4 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
= 4,4 km · s⁻¹

26 1. Référentiel Héliocentrique.
2. La force gravitationnelle de Jupiter sur la comète a perturbé sa trajectoire.
3.

$T = 2\pi\sqrt{\frac{a^3}{G \cdot M_s}} = 8{,}0 \times 10^{10} \text{ s} = 2{,}5 \times 10^3 \text{ ans}$

30 1. $\frac{T^2}{R^3} = k$; *3 d 13 h 14 min = 306840 s*

2. a.

$M_p = \frac{4\pi^2 \cdot R^3}{G \cdot T^2} = \frac{4\pi^2 \times (6{,}7 \times 10^8)^3}{6{,}67 \times 10^{-11} \times (306840)^2}$
$= 1{,}9 \times 10^{27} \text{ kg}$

b. Jupiter.

33 1. Référentiel Tchouricentrique.

$T = 2\pi\sqrt{\frac{R^3}{G \cdot M_t}}$ = AN : $T = 2{,}4 \times 10^3 \text{ s} = 41 \text{ min}$

$\vec{F} = -G\frac{m \cdot M}{R^2}\vec{u}_r = m \cdot \vec{g}$ donc $\vec{g} = -G\frac{M}{R^2}\vec{u}_r$

37 1. Il s'agit d'un référentiel Lunocentrique.

2. $\vec{F} = G\frac{m \cdot M_L}{(R_L + h)^2}\vec{n}$ et $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$

donc $\vec{a} = G\frac{M_L}{(R_L + h)^2}\vec{n}$

3. $\vec{a} = \frac{v^2}{R_L + h}\vec{n}$ dans le repère de Frenet donc

$m \cdot \frac{v^2}{R_L + h}\vec{n} = G\frac{m \cdot M_L}{(R_L + h)^2}\vec{n}$ et $v = \sqrt{\frac{G \cdot M_L}{R_L + h}}$.

4. $T = 2\pi\sqrt{\frac{(R_L + h)^3}{G \cdot M_L}}$ $T = 7{,}09 \times 10^3 \text{ s} = 1{,}97 \text{ h}$

Soit près de 2 heures.

Problème à résoudre

Les ondes électromagnétiques ne traversent pas la Lune qui cache par Apollo une bonne partie de sa trajectoire. Le LEM ne peut donc communiquer avec la capsule qu'au niveau de son horizon. L'angle parcourue est de 2β.

$\beta = \arccos\left(\frac{R_L}{R_L + h}\right)$

$\beta = \arccos\left(\frac{1{,}74 \times 10^6}{1{,}74 \times 10^6 + 110 \times 10^3}\right) = 19{,}9°$

$T_{COM} = \frac{1{,}99 \times 2 \times 19{,}9}{360} = 0{,}219 \text{ h} = 789 \text{ s}$. À chaque révolution, la communication n'est possible que pendant 789 s.

Chapitre 14

1 B. **2** B. **3** C. **4** B. et C. **5** A. **6** C. **7** B. **8** A. et B. **9** C.

11 1. $\vec{\pi}$: résultante des forces pressantes qui modélisent les actions mécaniques d'un fluide sur la surface d'un objet immergé. Force verticale, vers le haut de valeur égale au poids du volume de fluide déplacé.
2. $\pi = 45{,}9 \times 10^{-3} \times 9{,}81 = 4{,}50 \times 10^{-1}$ N
$\pi = 1{,}97 - 1{,}52 = 4{,}50 \times 10^{-1}$ N

16 1. a. $Q = v \cdot S$ · AN : $Q = 8{,}3 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
$= 3{,}0 \times 10^3 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$
b. $\Delta t = V/Q$ · AN : $\Delta t = 12/3{,}0 \times 10^3 = 14$ s
2. $v_A \cdot S_A = v_B \cdot S_B$ donc $v_B = v_A \cdot S_A/S_B$ · AN : $v_B = 4{,}1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

19 1. $P_1 + \frac{1}{2}\rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot z_1$
$= P_2 + \frac{1}{2}\rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot z_2$

2. $P_2 = P_1 + \frac{1}{2}\rho \cdot (v_1^2 - v_2^2) + \rho \cdot g \cdot (z_1 - z_2)$
AN : $P_2 = 1{,}3 \times 10^5$ Pa

22 1. Si $P_B < P_A$ alors $v_B > v_A$ (principe de Venturi)

2. a. $P_A + \frac{1}{2}\rho \cdot v_A^2 = P_B + \frac{1}{2}\rho \cdot v_B^2$.

b. $v_B = \sqrt{\frac{2(P_A - P_B)}{\rho} + v_A^2}$ AN : $v_B = 4{,}9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Ce résultat valide la réponse en 1.

23 La portance provient de la forme particulière de l'aile d'un avion. L'air parcourt une distance plus grande sur sa face supérieure que celle inférieure. Le temps de parcours restant le même, la vitesse de l'air y est alors plus grande et la pression de l'air diminue. L'aile de l'avion est aspirée vers le haut. Cette action est modélisée par une force nommée *portance*.

28 1. a. Lorsque le ludion est en équilibre, son poids et la poussée d'Archimède se compensent :
$m_L \cdot g = \rho_{eau} \cdot (V_A - V_B) \cdot g$
soit $V_A = \frac{m_L}{\rho_{eau}} + V_B$ b. $V_A = 5{,}0 \text{ cm}^3$.



2. a. V_A d'air dans le ludion diminue.
b. Si V_A diminue alors π diminue et devient inférieure au poids du ludion qui descend.

29 1. a. $v = Q/S$ · AN : $v_A = 3{,}4 \times 10^1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

$Q_A = Q_B$ soit $v_A = \frac{v_B \cdot S_B}{S_A}$, $S_B > S_A$
alors $v_A > v_B$.

b. Au sommet du jet, $P_{eau} = P_{atm} = 10^{15}$ hPa et $v_{eau} = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

2. a. $P_A + \frac{1}{2}\rho \cdot v_A^2 + \rho \cdot g \cdot z_A$
$= P_S + \frac{1}{2}\rho \cdot v_S^2 + \rho \cdot g \cdot z_S$ (S : point situé au sommet du jet).

b. Soit $z_A = 0$ m.
De plus $v_S = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $P_S = P_{atm}$, $P_A = P_{atm}$ et $z_S = h$

$P_{atm} + \frac{1}{2}\rho \cdot v_A^2 = P_{atm} + \rho \cdot g \cdot h$

donc $h = \frac{v_A^2}{2 \cdot g}$, AN : $h = 5{,}9 \times 10^1$ m

c. La valeur est calculée en négligeant les frottements de l'air sur le jet d'eau.
d. h augmente si v_A augmente. Il faut réduire le diamètre de la tuyère pour augmenter la vitesse d'éjection de l'eau.

34 1. a. Action de la Terre (poids $\vec{P}$) et celle du fluide (poussée d'Archimède $\vec{\pi}$).



$\vec{P} = -m_A \cdot g \cdot \vec{k} = -\rho_A \cdot g \cdot V \cdot \vec{k}$
$\vec{\pi} = \rho_{eau} \cdot g \cdot V \cdot \vec{k}$
b. $\vec{P} + \vec{\pi} = \vec{0}$.
Sur (Oz) :
$-\rho_A \cdot g \cdot V + \rho_{eau} \cdot g \cdot V = 0$
soit $\rho_A = \rho_{eau}$ à 24 °C

c. *« ... la masse volumique du liquide dans la colonne décroît fortement lorsque la température augmente »*.
Pour des T > 24 °C, ρ_{eau} diminue et devient inférieure à 997,38 kg · m⁻³ = ρ_A . $P_A > \pi_A$: la sphère A coule.

2. a. $\rho_B = \rho_{eau}$ à 22 °C
Pour la sphère B,
$P_B = \rho_{eau}$ à 22 °C > ρ_{eau} à 24 °C.
A 24°C, $P_B > \pi_B$. La sphère reste en bas.
b. B s'élève lorsque $\pi_B > P_B$ soit pour $\rho_{eau} > \rho_B = \rho_{eau}$ à 22 °C.
Cela se produit pour les températures T > 22°C.

3. a. $\Delta m = m_B - m_A = (\rho_B - \rho_A) \cdot V$ soit Δm = 9,6 × 10⁻⁷ kg = 1 mg.
La masse volumique qui décroît plus fortement que celle de l'eau lorsque la température augmente. Une différence de masse d'1 mg entre deux sphères correspond à des températures plus proches. Cela permet de graduer plus finement le thermomètre.
b. 22°C ≤ T ≤ 24 °C soit T = 23°C avec une incertitude type de 1°C.

35 1. $Q = V/\Delta t = S \cdot v$ donc $v = V/(S \cdot \Delta t)$, AN : $v = 1{,}3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
2. a. Une fonction affine.
b. Ordonnée à l'origine : la pression du fluide au repos. $P = 1021$ hPa.
c. $P + \frac{1}{2}\rho \cdot v^2 = k$ = constante
soit $P = k - \frac{1}{2}\rho \cdot v^2$; $P = f(v^2)$: fonction affine décroissante de coefficient directeur $-\frac{1}{2}\rho$.

40 a. Débit volumique sanguin reste constant. b. Vitesse d'écoulement du sang diminue au niveau de l'anévrisme. c. Pression sanguine augmente au niveau de l'anévrisme.

COUP DE POUCE

Chapitre 14

Activité 4

- En régime permanent, le débit volumique d'un fluide en écoulement se conserve.
- La vitesse de l'eau en sortie de pompe dépend du débit volumique et de la section de la canalisation d'alimentation.
- Bien penser qu'à son altitude maximale, le fluide est immobile, choisir de manière judicieuse une origine pour les altitudes et tenir compte des données fournies permet de simplifier la relation de Bernoulli.
- La hauteur d'un étage peut être estimée à 3 m.

Problème

$Q = 5{,}0\ \text{L} \cdot \text{min}^{-1} = 8{,}3 \times 10^{-5}\ \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.
Diamètre estimé de l'anévrisme : 5,0 cm
$S_{sortie} = 3{,}1 \times 10^{-4}\ \text{m}^2$
et $S_{anévrisme} = 2{,}0 \times 10^{-3}\ \text{m}^2$

$v = \dfrac{Q}{S}$; $v_{sortie} = 2{,}7 \times 10^{-1}\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

et $v_{anévrisme} = 4{,}2 \times 10^{-2}\ \text{m}^2$
Relation de Bernoulli :

$$P_A + \frac{1}{2}\rho \cdot v_A^2 + \rho \cdot g \cdot z_A = P_B + \frac{1}{2}\rho \cdot v_B^2 + \rho \cdot g \cdot z_B$$

$$P_B = P_A + \frac{1}{2}\rho \cdot (v_A^2 - v_B^2) + \rho \cdot g \cdot (z_A - z_B)$$

AN : $P_B = 1{,}35 \times 10^4$ Pa = 10,1 cm Hg
Au niveau de l'anévrisme, la pression sanguine augmente de 9,3 cm à 10,1 cm Hg

Chapitre 15

1 B. **2** A et C. **3** A. **4** B. **5** C. **6** C. **7** B et C. **8** B. **9** A et C. **10** C.

11 1. a. Au degré d'agitation des molécules
b. À la fréquence des chocs sur les parois
c. Au nombre et à la masse des particules
2. a. La température mesurée
b. La pression mesurée
3. a. → à f. b. → d. c. → e.

12 1. Température T en kelvin (K) traduit le degré d'agitation des molécules du système.
$T = \theta$ (en °C) + 273,15
2. – 22 °C < 275 K < 1,85 °C < 16 °C
3. Pas d'agitation des particules à $T = 0$ K : zéro absolu. T obligatoirement positive.

16 1. a. $n = \dfrac{m}{M}$. AN : $n = 2{,}6 \times 10^{-1}$ mol
b. $T = 273{,}15 + 17 = 290{,}15$ K et $V = 4{,}8 \times 10^{-3}$ m³. c. $P = \dfrac{n \cdot R \cdot T}{V}$. AN : $P = 1{,}30 \times 10^5$ Pa
2. a. La température thermodynamique doit être exprimée en K, non en °C.
b. $T = 273{,}15 + 34 = 307{,}15$ K. AN : $P = 1{,}38 \times 10^5$ Pa
c. Pour $T = 290{,}15 \times 2 = 580{,}3$ K = 307,15 °C

19 1. $n = \dfrac{PV}{R \cdot T}$. AN : $n = 4{,}4 \times 10^{-2}$ mol.
2. $N = n \cdot N_A$ · AN : $N = 2{,}6 \times 10^{22}$ molécule soit $V = 1{,}0 \times 10^{-5}$ L = 10 µL.
3. Le volume propre des molécules (19 µL) est négligeable devant celui qu'elles occupent (1 L). Le diazote peut être assimilé à un gaz parfait.

25 1. a. $P = \dfrac{n \cdot R}{V}$.
AN : $P = 1{,}2 \times 10^8$ Pa = 1200 bar
b. À pression constante, une augmentation de la quantité de matière du gaz s'accompagne d'une augmentation de la température.
2. a. $V = \dfrac{n \cdot R \cdot T}{p}$. AN : $V = 1{,}2 \times 10^{-2}$ m³ soit 1200 fois plus grand.
b. L'augmentation excessive de la pression se traduit par une augmentation de la fréquence des chocs des molécules sur les parois du récipient et d'une augmentation du volume.

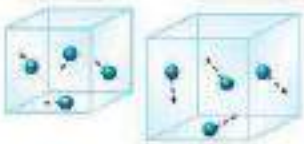
29 1. a. $\theta = 56{,}0$ °C, $u_\theta = 1$ °C ; V = 28,0 mL, $u_V = 1$ mL. b. $V = 2{,}80 \times 10^{-3}$ m³ et $T = 299$ K
2. a. $P_{GP} = \dfrac{nRT}{V}$. b. $P_{GP} = 1{,}78 \times 10^5$ Pa

et $u_P = 1{,}78 \times 10^5 \cdot \sqrt{\left(\dfrac{1}{299}\right)^2 + \left(\dfrac{1}{28{,}0}\right)^2}$

$= 6{,}4 \times 10^3$ Pa c. 1,71 bar < P_{GP} < 1,84 bar
3. a. $P_{GP} = 1{,}96$ bar, $u_P = 0{,}005$ bar. 1,955 bar < P_{GP} < 1,965 bar
b. L'air peut être assimilé à un gaz parfait (P_{GP} est contenu dans l'encadrement de P_{GP}).

31 1. a. À l'échelle macroscopique, T augmente et P augmente. Mais, la quantité de matière de l'air et le volume du pneu restent constants : la masse volumique reste constante.
b. $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$. Si T augmente, P augmente.
c. $n = 1{,}6$ mol
$T = 328{,}6$ K = 55,4 °C = 55 °C
2. Pour une quantité de gaz donnée à volume constant, une augmentation du degré d'agitation des particules (de la température) s'accompagne d'une augmentation de la fréquence des chocs sur les parois (de la pression). La masse volumique reste quant-à elle constante car le nombre de particules et le volume occupé restent constants.

32 1. a. La masse volumique du gaz diminue (son volume augmente), la pression reste constante et la température augmente.
b. $n = \dfrac{P \cdot V}{T \cdot R}$
Initialement : $n = 1{,}0 \times 10^{-2}$ mol
À l'état final, pour $l = 2{,}0$ cm, $V = l \cdot \pi \cdot d^2 + V_{(initial)}$ soit $V = (250 + 3{,}1) \times 10^{-6}$ m³ = 253,1 mL.
$T = \dfrac{P \cdot V}{n \cdot R}$. $T = 304{,}4$ K = 31 °C soit une augmentation de 12 °C.
2. a. État initial État final.



b. Le degré d'agitation des particules est plus important lorsque la température du gaz augmente. Leur vitesse est plus grande et elles tendent à occuper un volume plus important à pression constante.

38 **Démarche experte**
Volume du ballon Doc 1 : 0,7 cm ↔ 1,8 m (taille d'une personne) donc 1,4 cm (diamètre du ballon) ↔ 3,6 m (en réalité).

$V = \dfrac{4}{3}\pi \cdot R^3$. $V = 25$ m³
$V_{max} = 6$ V soit $V_{max} = 150$ m³.
Pression et température des couches supérieures de la couche d'ozone : $P = 3$ hPa et $\theta = -5$ °C.
Quantité de matière constante d'hélium dans le ballon : $n = \dfrac{P \cdot V}{T \cdot R}$. $n = 1{,}0 \times 10^2$ mol
Volume du ballon dans les couches supérieures : $V = \dfrac{n \cdot R}{p}$. AN : $V = 7{,}4 \times 10^2$ m³
Ce ballon ne pourra pas atteindre la couche d'ozone (≈ 50 km d'altitude). Il pourra atteindre les couches inférieures situées à des altitudes légèrement supérieures à 10 km où $\theta = -55$ °C et P = 200 hPa car dans ces conditions : $V = \dfrac{n \cdot R \cdot T}{P}$. AN : $V = 91$ m³.
Démarche avancée
1. a. Doc 1 : 0,7 cm ↔ 1,8 m (taille d'une personne) donc 1,4 cm (diamètre du ballon) ↔ 3,6 m (en réalité).
$V = \dfrac{4}{3}\pi \cdot R^3$. $V = 25$ m³
$n = \dfrac{P \cdot V}{T \cdot R}$. $n = 1{,}0 \times 10^3$ mol
b. À $P = 3$ hPa et $\theta = -5$ °C.
$V = \dfrac{n \cdot R \cdot T}{P}$. AN : $V = 7{,}4 \times 10^2$ m³
c. Non car $V_{max} = 6$ V soit $V_{max} = 150$ m³.
2. $V_{max} = 150$ m³.
$P = \dfrac{n \cdot R}{V}$. AN : $P = 120$ hPa à – 56 °C
et $P = 154$ hPa à 5 °C.
À 10 km d'altitude, $\theta = -56$ °C et $P = 200$ hPa. Le ballon atteint cette altitude.
À 50 km d'altitude, $\theta = 5$ °C et $P = 3$ hPa. Le ballon ne peut pas atteindre cette altitude.

Chapitre 16

1 A et C. **2** A et C. **3** B. **4** B. **5** A et B. **6** B. **7** A. et C. **8** C. **9** A. **10** A. et C. **11** A, B et C. **12** A, B et C. **13** A, B et C.

14 Oui, il existe une énergie propre à cette eau appelée énergie interne : énergies cinétiques microscopiques et énergies potentielles microscopiques.



16 1. Faux. Ajouter son énergie interne U.
2. Vrai.

COUP DE POUCE

Chapitre 15

Activité 3

- Les limites d'un modèle sont atteintes lorsque le comportement réel constaté s'écarte trop des prévisions du modèle.
- Les valeurs initiales de la température, du volume et de la pression du gaz détermine sa quantité de matière.
- La loi de Mariotte, pour une quantité donnée d'un gaz à température constante, permet de prévoir l'évolution des valeurs de sa pression et de son volume.

3. Faux. L'énergie n'est pas détruite mais transférée du système au milieu extérieur.

22 Les différents modes de transferts thermiques pour obtenir de l'eau chaude :
– par rayonnement sans support de matière ;
– l'air réchauffé par le Soleil transfert de l'énergie par conduction (support matériel mais non déplacement de matière) au sac plastique qui lui-même transfert de l'énergie par conduction à l'eau ;
– par convection au sein du liquide (déplacement de matière).

23 1. Pour le système (café) :
$\Delta U_{café} = \rho_{eau} \cdot V \cdot c_{eau} \cdot \Delta T$
AN : $\Delta U_{café} = 1,0 \times 1,0 \times 4,18 \times (52 - 60) = -33$ kJ.
2. En supposant que la bouteille thermos est parfaitement isolée : $\Delta U_{café+thermos} = 0$.
3. $\Delta U_{café+thermos} = \Delta U_{café} + \Delta U_{thermos} = 0$.
Donc $\Delta U_{thermos} = -\Delta U_{café} = 33$ kJ.

26 **Température moyenne terrestre**
1. a. Le flux thermique reçu du Soleil à la surface de la Terre va diminuer.
b. La température est liée au flux thermique reçu donc celle-ci est diminuée avec l'albédo.
2. a. L'effet de serre.
b. Son effet est d'augmenter la température moyenne terrestre.

28 1. Le système (café) cède de l'énergie.
2. $T_{amb} = 25$ °C
3. Solution générale de l'équation différentielle : $T(t) = A \cdot e^{-\gamma \cdot t} + B$
Quand t tend vers l'infini, $T = T_{amb}$ donc $B = T_{amb}$
À $t = 0$ s, $T = T_0$ donc $T_0 = A + T_{amb}$ donc $A = T_0 - T_{amb}$
Donc :
$$T(t) = (T_0 - T_{amb}) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + T_{amb}$$
D'où l'expression de $T(t)$ en fonction de γ :
$$T(t) = (75 - 25) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + 25$$
Donc :
$$T(t) = 50 \cdot e^{-\gamma \cdot t} + 25$$
4. a. Après 5 minutes le café est à 50 °C.
Donc $T(5) = 50 \cdot e^{-\gamma \cdot 5} + 25 = 50$
Donc $e^{-\gamma \cdot 5} = 1/2$
Donc $\gamma = (\ln 2) / 5$
b. Expression générale de $T(t)$:
$$T(t) = 50 \cdot e^{-(\ln 2 / 5) \cdot t} + 25$$

30 1. Le sauna reçoit $\Delta E = P \cdot \Delta t_{chauffe}$
A.N. $\Delta E = 7,5 \times 60 = 4,5 \times 102$ kJ
2. L'énergie est perdue en 5,0 minutes car la température est constante dans la sauna. La puissance qui traverse la paroi est donc :
$\Phi = \Delta E / \Delta t_{chauffe}$
A.N. $\Phi = 450 / 300$ donc $\Phi = 1,5$ kW
$R = \Delta T / \Phi$ A.N. $R = (80 - 18) / 1\,500$
donc $R = 4,1 \times 10^{-2}$ K · W^{-1}

34 1. Tamb = – 5 °C
2. Solution générale de l'équation différentielle (loi de Newton) :
$$T(t) = A \cdot e^{-\gamma \cdot t} + B$$
Quand t tend vers l'infini, $T = T_{amb}$ donc $B = T_{amb}$
À $t = 0$ s, $T = To$ donc $To = A + T_{amb}$ donc $A = To - T_{amb}$ Donc : $T(t) = (T_o - T_{amb}) \cdot e^{-\gamma \cdot t} + T_{amb}$
D'où $T(t) = 25 \cdot e^{-\gamma \cdot t} + 5$
3. a. À $t = 30$, $T(30) = 15 = 25 \cdot e^{-\gamma \cdot 30} - 5$
Donc $25 \cdot e^{-\gamma \cdot 30} = 20$ Donc $e^{-\gamma \cdot 30} = 4/5$
Donc $-30\gamma = \ln 4/5$ Donc $\gamma = \ln (5/4)/30$
b. Expression générale de $T(t)$:
$$T(t) = 25 \cdot e^{-(\ln (5/4)/30) \cdot t} - 5$$
4. On cherche le temps t pour lequel on a $T(t) = 37$ °C
$25 \cdot e^{-(\ln (5/4)/30) \cdot t} - 5 = 37$
D'où $t = 30 \cdot \ln (42/25)/(\ln (4/5)$
Donc $t = -70$ min = 1 h 10
Heure du crime : 2 h 20 – 1 h 10 = 1 h 10

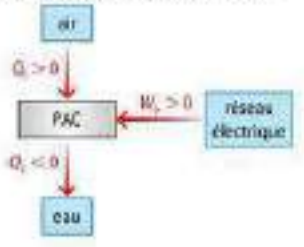
37 1. a. Phénomène de convection de l'air à l'intérieur du réfrigérateur.
b. Placer en hauteur car l'air chaud à tendance à monter et l'air froid à descendre par convection.
2. a. Le transfert thermique se fait de la source chaude vers la source froide donc de l'extérieur vers l'intérieur du réfrigérateur.
b. $\Phi = \Delta T / R = 16 / 0,89 = 18$ W
c. 1 an = 365,25 × 24 = 8 766 h
$\Delta U = Q = \Phi \cdot \Delta t = 18 \times 8\,766 = 1,6 \times 10^5$ Wh = $1,6 \times 10^2$ kWh

39 1.



2. $\eta = E_{utile} / E_{dépensée} = Q_1 / W_{el} = \rho \cdot V \cdot c \cdot \Delta T / P \cdot \Delta t$
AN $\eta = 1,0 \times 0,40 \times 4,18 \times 10^3 \times (85 - 18) / (1\,500 \times 80) = 0,94 = 94$ %

36 1. a. La température de l'eau augmente, donc son agitation thermique moléculaire (ou énergie cinétique microscopique) augmente. Son énergie interne va ainsi augmenter.
b. Pour le système (eau), $\Delta U_{eau} = m_{eau} \cdot c_{eau} \cdot \Delta T$ où ΔT est la variation de la température de l'eau.
AN $\Delta U_{eau} = 10,0 \times 10^3 \times 4,18 \times 10^3 \times (27 - 10) = 7,1 \times 10^8$ J
c. $Q_{PAC} = \Delta U_{eau} = 7,1 \times 10^8$ J
2. a. La source froide est l'air qui reste à T constante. La source chaude est la piscine dont la température va augmenter.
b.



c. Rendement énergétique : $\eta = E_{utile} / E_{dépensée} = Q_{PAC} / We = 7,1 \times 10^8 / 2,4 \times 10^8 = 7,1 / 2,4 = 3$
d. Pour obtenir la même température par un chauffage direct sans source froide, le système aurait dû prélever $We' = Q_{PAC} = 7,1 \times 10^8$ J directement au réseau électrique.
e. La PAC est 3 fois plus performante qu'un système de chauffage électrique classique.

46 a. Le transfert thermique se fait du randonneur (33 °C) vers l'air et le sol (15 °C).
b. Il s'agit d'un transfert thermique par conduction.
2. Surface du matelas $S_{matelas} = 1,93 \times 0,62 = 1,2$ m^2. On estime 0,5 m^2 comme surface du randonneur en contact avec le matelas.
Le flux thermique ϕ traversant le matelas « isotapis » est égale à :
$\Phi = (T_c - T_f)/R_{th} = (T_c - T_f)/e / \lambda \cdot S) = (T_c - T_f) \cdot \lambda \cdot S)/e$
AN. $\Phi = (33 - 15) \times 0,03 \times 0,5/1,1 \times 10^{-2}$
Donc $\Phi = 2 \times 10 \cdot$ W
Le flux thermique traversant le matelas « thermoplus », dans les mêmes conditions d'utilisation, est de 40 W.
Donc $\Phi_{thermoplus} > \Phi_{isotapis}$
Le matelas qui est le meilleur isolant est donc le matelas « isotapis ».

Chapitre 17

1 C. **2** A et C. **3** A et C. **4** B. **5** C. **6** A. **7** C.

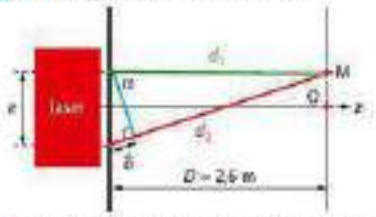
8 1. a. Effectuer la mesure du niveau d'intensité sonore avec un sonomètre.
b. Pour N guitares : $I = I_0 \cdot 10^{\frac{L}{10}}$
AN : $I = 1,0 \cdot 10^{-12} \times 10^{\frac{75}{10}} = 3,2 \cdot 10^{-5}$ W · m^{-2}.
Pour une seule guitare à 65 dB :
$I' = 1,0 \cdot 10^{-12} \times 10^{\frac{65}{10}} = 3,2 \cdot 10^{-6}$ W · m^{-2}.
Pour connaître le nombre N :
$N = \frac{I}{I'} = \frac{3,2 \cdot 10^{-5}}{3,2 \cdot 10^{-6}} = 10$. Donc 10 guitares jouent ensemble.
2. $I'' = 1,0 \cdot 10^{-12} \times 10^{\frac{50}{10}} = 1,0 \cdot 10^{-7}$ W · m^{-2}.
$I + I'' = 3,2 \cdot 10^{-5} + 1,0 \cdot 10^{-7} = 3,21 \cdot 10^{-5}$ W · m^{-2}.
Le niveau d'intensité sonore associé vaut alors : $L'' = 10 \log(\frac{I + I''}{I_0}) = 75$ dB, l'intensité sonore du triangle elle est négligeable.

11 1. 120 dB et 160 dB se situe au-dessus du seuil de douleur, 60 dB est situé dans la zone d'inconfort, proche du bruit d'une cantine.
2. On peut donner comme conseils : de s'éloigner de la source sonore ; de protéger leur animal avec un casque ; de ne pas amener leur animal pour ne pas l'exposer ; d'aller voir que des feux d'artifices à bruits contenus.

16 1. a. Ici $\delta = 4 - 1 = 3$ m, et $\lambda = 2$ m, le point est placé tel que $\delta = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$, ici $\delta = 3 \cdot \frac{\lambda}{2}$. Il est donc sur un minimum d'amplitude.
b. Interférences destructives.

2. $\delta = 14 - 6 = 8$ m, soit $\delta = k \cdot \lambda$ ici $\delta = 4 \cdot \lambda$. Maximum d'amplitude = interférences constructives.

18 1. a. $\delta = d_2 - d_1$. Ce qui donne :



b. Le point O est sur une frange brillante, car il est tel que $\delta = 0$: les interférences sont constructives si $\delta = k \cdot \lambda$, et ici $k = 0$.
2. Il y aura le premier maximum d'intensité lumineuse pour $\delta = \lambda$, et ici $k = 1$.
3. Puisque $\delta = \frac{e \cdot x}{D}$ et que $x = i$ et $\delta = \lambda$,
alors $\delta = \frac{e \cdot i}{D} = \lambda$ soit $i = \frac{\lambda \cdot D}{e}$.
Alors $e = \frac{\lambda \cdot D}{i}$. AN : $e = \frac{633 \cdot 10^{-9} \times 2{,}6}{3{,}4 \cdot 10^{-3}}$
$= 4{,}8 \cdot 10^{-4}$ m = 480 µm.

20 1. a. 200 battements, c'est 200 Hz.
$\Delta f = \frac{f \cdot v}{c}$ AN : $\Delta f = \frac{200 \times 7}{340} = 4{,}1$ Hz
La fréquence du son perçu lorsqu'il se rapproche est donc $f + \Delta f = 200 + 4 = 204$ Hz.
b. Quand il s'éloigne il faut calculer la fréquence perçue : $f - \Delta f = 200 - 4 = 196$ Hz.
2. Si un autre bourdon vole à la même vitesse à côté de lui, il est perçu comme immobile et à la même fréquence soit 200 Hz.

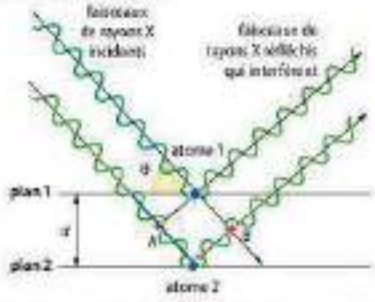
22 1. La diffraction : onde qui traverse une ouverture change de direction de propagation sans modification de longueur d'onde.
2. La diffraction met en évidence le caractère ondulatoire de la lumière.
3. – 0,014 tache centrale + 0,014 ce qui donne : $d_{airy} = 0{,}028$ m = 2,8 cm.
4. Le diamètre de la tache diminue quand l'ouverture du télescope augmente. Un télescope de grand diamètre, limite le phénomène de diffraction.

24 1. Pour 5λ, on mesure 1,4 cm, soit $\lambda = 0{,}28$ cm sur le papier. Mais l'échelle fournie indique que 0,8 cm représente 1 m.
$\lambda = \frac{0{,}28 \times 1}{0{,}8} = 0{,}35$ m. $f = \frac{c}{\lambda}$
AN : $f = \frac{340}{0{,}35} = 971$ Hz.
2. En utilisant le décalage Doppler, $\Delta f = \frac{f \times v}{c}$, on peut isoler $v = \frac{\Delta f \times c}{f}$
AN : $v = \frac{(971 - 810) \times 340}{810} = 67{,}6$ m · s^{-1} = 243 km · h^{-1}.

25 1. $\theta = \frac{\lambda}{a}$ et pour les petits angles :
$\theta = \tan\theta = \frac{L}{2D}$ Alors $\frac{\lambda}{a} = \frac{L}{2D}$.
2. $L = \frac{2 \cdot \lambda \cdot D}{a}$ pour le bleu :
$L_B = \frac{2 \times 405 \cdot 10^{-9} \times 220 \cdot 10^{-2}}{200 \cdot 10^{-6}} = 9{,}0$ mm
pour le vert,
$L_V = \frac{2 \times 525 \cdot 10^{-9} \times 220 \cdot 10^{-2}}{200 \cdot 10^{-6}} = 12$ mm
pour le rouge :
$L_R = \frac{2 \times 650 \cdot 10^{-9} \times 220 \cdot 10^{-2}}{200 \cdot 10^{-6}} = 14$ mm
3. a. Le point central de la figure de diffraction reçoit toutes les couleurs, donc d'après la synthèse additive fournie, il est blanc.
b. La tache centrale mesure 9 mm pour le bleu, répartie de – 4,5 mm à + 4,5 mm. Donc à $x = 4{,}5$ mm, il y a la première extinction du bleu, rouge + vert = jaune.
c. De même, à $x = 7$ mm, il y a la première extinction du rouge, bleu + vert = Cyan.
d. La figure de diffraction en lumière blanche est la superposition de chacune des figures de diffraction de chaque couleur qui la compose.

28 La fonction log n'est pas additive comme une fonction linéaire : $\log a + \log b \neq \log(a+b)$
2. a. 91 + 1,5 = 92,5 dB. b. 82 + 3 = 85 dB.

29 Démarche experte
Les interférences constructives si $\delta = k \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin\theta$.
La distance doit être la plus petite entre deux plans voisins successifs, soit $k = 1$.
$d = \frac{\lambda}{2 \sin\theta}$ AN : $d = \frac{145}{2 \times \sin 11{,}5°} = 364$ pm
Démarche avancée
1. La différence de marche vient de la différence de parcours des deux ondes incidentes et réfléchies.



Elle correspond à deux fois le segment bleu, qui se calcule ainsi :
$\sin\theta = \frac{\text{côté opposé}}{\text{hypoténuse}} = \frac{d}{\delta / 2}$, $\delta = 2\,d \sin\theta$.
2. Les interférences constructives se produisent quand $\delta = k \cdot \lambda$.
Les interférences destructives se produisent quand $\delta = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$
3. Pour une différence de marche minimale, et pour des interférences constructives, prendre $k = 1$; $\delta = \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin\theta$, ce qui permet d'isoler
$d = \frac{\lambda}{2 \sin\theta}$ AN : $d = \frac{145}{2 \times \sin 11{,}5°} = 364$ pm.

30 1. $\Delta f = \frac{f \times v}{c}$ AN : $\Delta f = \frac{800 \times 30}{340} = 71$ Hz
$f + \Delta f = 800 + 71 = 871$ Hz.
2. Lorsque le camion s'éloigne à la même vitesse le décalage Doppler ne change pas : $f - \Delta f = 800 - 71 = 729$ Hz.

Chapitre 18

1 B et C. **2** B. **3** B. **4** C. **5** B. **6** A et B. **7** B et C. **8** B. **9** B et C. **10** B.

14 1. Pour que la lunette soit afocale, il faut que $O_1O_2 = f'_1 + f'_2 = 105$ cm
2. a + 2. b



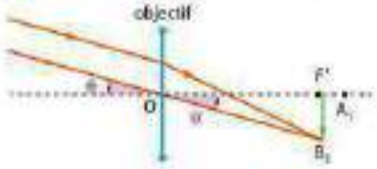
16 1. + 2. a. + 3. a.



2. b. L'image intermédiaire se forme dans le plan focal image de l'objectif qui coincide avec le plan objet de l'oculaire.
3. b. Un œil normal n'accommodera pas pour observer l'image définitive A'B' car elle se forme à l'infini.

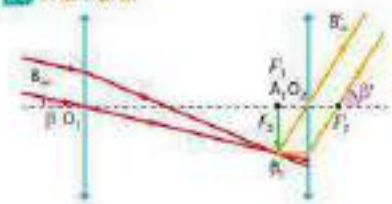
19 1. Par définition : $\overline{G} = \frac{\alpha'}{\alpha}$
2. Dans les triangles rectangles $O_1A_1B_1$ et $O_2A_1B_1$, rectangle en A_1, on peut écrire :
$\tan(\alpha) \approx \alpha = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{O_1A_1}} = \frac{\overline{A_1B_1}}{f'_1}$
et $\tan(\alpha') \approx \alpha' = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{O_2A_1}} = \frac{\overline{A_1B_1}}{-f'_2}$
Soit $\overline{G} = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{f'_1}{f'_2}$
3. $\overline{G} = -\frac{f'_1}{f'_2} = -\frac{50{,}0}{1{,}0} = -50$

22 1. 76 cm est le diamètre de l'objectif.
2. a.



b. D'après le schéma : $A_1B_1 = f'_1 \times \tan\theta$
$= 17{,}89 \times \tan(1/3600) = 8{,}7 \times 10^{-5}$ m = 87 µm.
3. Par définition : $\overline{G} = -\frac{f'_1}{f'_2}$ donc $f'_2 = -\frac{f'_1}{\overline{G}}$.
Le grossissement de – 1 800 est obtenue avec un oculaire de distance focale 9,9 mm et celui de – 2 200 avec une distance focale de 8,1 mm.

24 1. a. + 2. a.



b. L'objectif donne de l'objet à l'infini une image intermédiaire située au foyer image de l'objectif : il faudrait donc placer l'écran à 30,0 cm de l'objectif.

2. b. Par définition, le grossissement de la lunette est le rapport : $\overline{G} = \frac{\beta'}{\beta}$.

Dans les triangles rectangles $O_1A_1B_1$ et $O_2A_1B_1$, rectangle en A_1, on peut écrire respectivement : $\tan(\beta) = \beta = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{O_1A_1}} = \frac{\overline{A_1B_1}}{f'_1}$ et

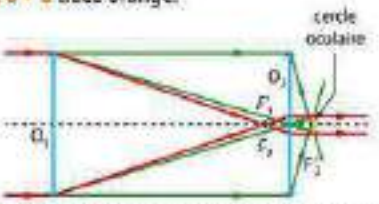
$\tan(\beta') = \beta' = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{O_2A_1}} = \frac{\overline{A_1B_1}}{-f'_2}$

Soit $\overline{G} = \frac{\beta'}{\beta} = -\frac{f'_1}{f'_2}$

3. Le grossissement de la lunette utilisée vaut $\overline{G} = -\frac{300}{50} = -6$: l'indication ne sera pas suffisamment grossie pour être déchiffrée.

28 1. a + b. tracé vert

2. a + b tracé orange.



c. C'est au niveau du cercle oculaire qu'il faut placer l'œil pour recevoir un maximum de lumière en provenance de l'objet à l'infini.

3. J'applique la relation de conjugaison à l'oculaire pour déterminer la position du cercle oculaire :

$\frac{1}{\overline{O_2C}} = \frac{1}{\overline{O_2O_1}} + \frac{1}{f'_2} = \frac{1}{-110} + \frac{1}{10} = 0,091\,cm^{-1}$

soit $\overline{O_2C} = 11$ cm le cercle oculaire se situe à 11 cm de l'oculaire.

Relation de grandissement :

$d_{CO} = \left|\overline{\gamma} \times d_{objectif}\right| = \left|\frac{\overline{O_2C}}{\overline{O_2O_1}} \times d_{objectif}\right|$

$= \left|\frac{11}{-110} \times 4,0\right| = 0,40\,cm = 4,0\,mm$

le cercle oculaire mesure 4,0 mm

31 1. L'image donnée par la lunette afocale se forme à l'infini. L'œil myope ne pourra pas en donner une image sur la rétine. Il faudra donc déplacer l'oculaire.

2. a. Pour une observation optimale, l'œil myope sera placé au niveau du cercle oculaire ; l'image A'B' donnée par la lunette devra être située à 50 cm du cercle oculaire soit $\overline{F'_2A'} = -50$ cm et $\overline{O_2A'} = -40$ cm.

Relation de conjugaison à l'oculaire :

$\frac{1}{\overline{O_2A_1}} = \frac{1}{\overline{O_2A'}} - \frac{1}{f'_2}$

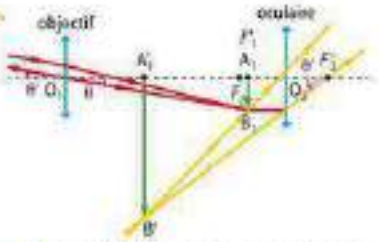
soit $\frac{1}{\overline{O_2A_1}} = \frac{1}{-40} - \frac{1}{10} = -0,125\,cm^{-1}$

soit $\overline{O_2A_1} = -8,0$ cm

L'image intermédiaire A1B1 se forme sur le foyer image F'1 et à 8,0 cm avant l'oculaire (10 cm pour un œil normal).

Il faut donc rapprocher l'oculaire de 2,0 cm

b.



3. a. La taille de l'image intermédiaire donnée par l'objectif vaut

$\overline{A_1B_1} = -f'_1 \times \tan\theta = -60 \times \tan(2,0 \times 10^{-2})$

$= -1,2$ cm.

b. La taille de l'image s'obtient en appliquant les relations de grandissement à l'oculaire :

$\overline{A'B'} = \overline{\gamma_{oculaire}} \times \overline{A_1B_1} = \frac{\overline{O_2A'}}{\overline{O_2A_1}} \times \overline{A_1B_1}$

$= \frac{-40}{-8} \times -1,2 = -6,0$ cm

$\tan(\theta') = \theta' = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{F'_2A'}} = \frac{-6,0}{-50} = 0,12$ rad

4. a. Le grossissement de la lunette ainsi réglée vaut : $\overline{G} = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{0,12}{-2,0 \times 10^{-2}} = -6$

b. Pour la lunette afocale :

$\overline{G} = -\frac{f'_1}{f'_2} = -\frac{60}{10} = -6$

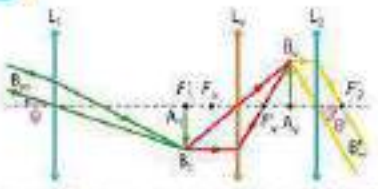
34 1. Le faisceau lumineux qui émerge de la lunette est concentré à la sortie de l'oculaire. Le faisceau qui pénètre dans l'œil de l'observateur est beaucoup plus intense que sans lunette. Plus le diamètre de l'objectif est grand, plus il collecte de lumière.

2. a. Théorème de Thalès dans les triangles L_1F_1 et F_2L_2 : $\frac{f'_1}{D} = \frac{f'_2}{a}$ soit : $\overline{G} = -\frac{f'_1}{f'_2} = -\frac{D}{a}$.

b. Il faut que a = 6 mm soit $\overline{G} = -\frac{90}{6} = -15$

c. $f'_2 = -\frac{f'_1}{\overline{G}} = \frac{60}{15} = 4,0$ cm

39 1.



2. Le véhicule est placé à 14 cm de l'objectif : qu'il donne de l'image intermédiaire A_1B_1 une image AVBV de même taille que A_1B_1 mais renversée par rapport à A_1B_1.

a. Tracés en orange sur le schéma du 1.

b. On vérifie graphiquement que l'image A_2B_2 est renversée par rapport A_1B_1 ($\overline{\gamma} < 0$) et de même taille $\left|\overline{\gamma}\right| = 1$.

c. Tracés en bleu sur le schéma du 1.

3. L'ajout du véhicule permet d'observer une image à l'endroit.

4. a. D'après le schéma : $\tan(\theta) = \theta = \frac{\overline{A_1B_1}}{f'_1}$ et

$\tan(\theta') = \theta' = \frac{\overline{A_1B_1}}{-f'_2} = \frac{-\overline{A_1B_1}}{-f'_2}$

soit $\overline{G} = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{f'_1}{f'_2} = \frac{10}{2,0} = 5$

b. $\theta' = \overline{G} \times \theta = \overline{G} \times \frac{h}{D} = 5 \times \frac{210}{6000} = 0,18$ rad.

Chapitre 19

1 A. **2** B. **3** B. **4** B. **5** A. **6** A et B. **7** B et C. **8** C. **9** A.

10 1. La lumière extrait des électrons d'un matériau.

2. a. Fréquence minimale de la lumière qui peut extraire un électron d'un matériau.

b. $4,3 \times 10^{-15}$ Hz ν_S $5,5 \times 10^{-15}$Hz

11 a. Onde b. Particule c. Particule d. Onde

12 1. $E_{photon} = h\nu = W + E_c$ donc $E_c = h\nu - W = hc/\lambda - W$

$E_c = 1,30 \times 10^{-19}$ J = 0,811 eV.

2. $v = \sqrt{2E_c / m}$

$v = 5,34 \times 10^5$ m · s^{-1}.

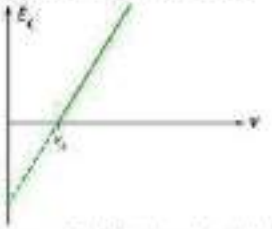
13 1. Si un électron est émis : $\nu \geq \nu_S$.

2. a. Loi de conservation de l'énergie :

$E_p = W + E_c$

b. $E_p = h\nu$ et $W = h\nu_S$ donc $E_c = h\nu - h\nu_S$.

c. On va avoir une courbe d'allure :



d. Pour $\nu \geq \nu_S$, $E_c = f(\nu)$ est une droite de coefficient directeur positif.

20 1. Energie → **cellule photovoltaïque** → Energie électrique

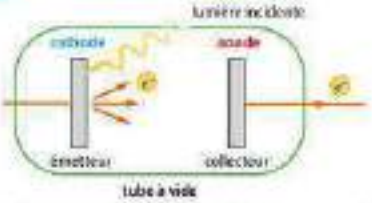
Lumineuse Energie thermique

2. $\eta = P_{électrique}/P_{lumineuse} \times 100$

3. $P_{électrique} = P_{lumineuse} \times \eta/100$

AN : $P_{électrique} = 7,7$ W.

21 1.



2. Si $\nu \geq \nu_S$, à la cathode, il y aura un effet photoélectrique et éjection d'électrons.

3. Les électrons partent de la cathode, elle a donc un signe −, il sont attirés par l'anode qui aura donc un signe +.

4. Le luxmètre.

27 1. Extraction d'électrons d'un matériau sous l'effet d'une onde électromagnétique.

2. L'effet photoélectrique a lieu pour $\lambda < \lambda_S$.

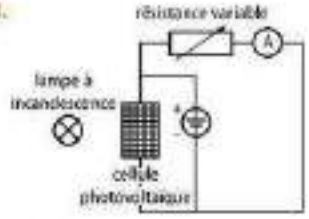
Et W(Zn) = h_c/λ_S donc $\lambda_S = h_c/W$(Zn)

AN : λ_S = 370 nm. $\lambda < 370$nm : raies dans l'UV.

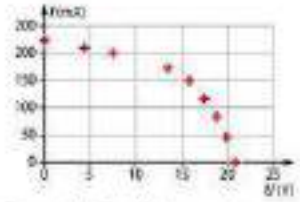
3. Conservation de l'énergie : $h_\nu = E_c + W$.

$E_c = h_c/\lambda - W$ AN : $E_c = 1,20 \times 10^{-19}$ J.

19 1.



2.



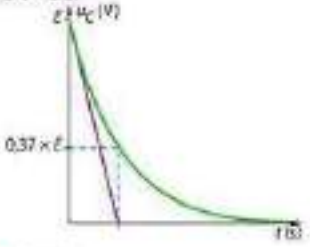
3. a. On calcule $P = U \times I$ pour chaque valeur de U et on trace $P = f(U)$.
On lit la valeur maximale : $P_{électrique} = 2{,}4$ W.
b. $\eta = P_{électrique}/P_{lumineuse} = P_{électrique}/E \times S$
$\eta = 10\,\%$
c. 10 % de l'énergie lumineuse est convertie en énergie électrique.
Il s'agit du rendement moyen d'une cellule photovoltaïque.

11 1. Accumulation de charges électriques de signes opposés.
2. Retour à l'équilibre des charges électriques.

17 1. a. $C = I \cdot \Delta t / U = 12 \times 10^{-3} \times 60 / 1{,}5 = 0{,}48$ F
b. Sur la photo 480 µF. Il y a un facteur 1 000.
2. 0,48 F est une valeur élevée pour la capacité d'un condensateur.

19 $\Delta t = C \cdot U / I = 330 \times 10^{-6} \times 42 / 2{,}0 \times 10^{-3} = 6{,}9 \times 10^{-6}$ s

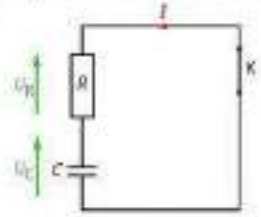
22 1. a. $i = C \cdot \dfrac{du_C}{dt}$ et $u_R = R \cdot i$
b. $\dfrac{du_C}{dt} + \dfrac{1}{RC} u_C = 0$
2. Voir cours p. 507.
3. a. Décharge du condensateur, u_C tend vers 0.
b. $\tau = R \cdot C = 2{,}2 \times 10^3 \times 470 \times 10^{-6} = 1{,}0$ s
donc $5\,\tau = 5$ s.
c.



25 1. $I = q / \Delta t$
2. $q = C \cdot u_C$

3. a. $q = I \cdot \Delta t = 1{,}0 \times 10^{-5} \times 500 \times 10^{-3} = 5{,}0 \times 10^{-4}$ C
b. $C = q / u_C = 5{,}0 \times 10^{-4} / 0{,}80 = 6{,}3 \times 10^{-4}$ C

27 1.



2. Voir cours p. 506-507
3. a. Graphiquement $\tau = 6$ ms
3. b. $\tau = R \cdot C$ donc $C = \tau / R = 6 \times 10^{-3} / 1{,}0 \times 10^3 = 6 \times 10^{-6}$ F $= 6$ µF

29 1. a. $\tau = R \cdot C$
b. $u_C(t) = E \times (1 - e^{-t/(RC)})$ donc $u_C(\tau) = E \times (1 - e^{-1}) = E \times 0{,}63$
2. Lecture graphique : $\tau = 1{,}3$ ms d'où $R = \tau / C = 1{,}3 \times 10^{-3} / 1{,}0 \times 10^{-6} = 1{,}3 \times 10^3\ \Omega = 1{,}3$ kΩ

Chapitre 20

1 B. **2** B. **3** B. **4** C. **5** A.
6 B. **7** A et B. **8** B. **9** B. **10** A.

17 1.

Équation	$C_2H_3CO_2H(\ell) + H_2O(\ell) \rightleftarrows C_2H_3CO_2^-(aq) + H_3O^+(aq)$			
État	n_1	n_2	n_3	n_4
initial	0,15	excès	0	0
intermédiaire	$0{,}15 - x$	excès	x	x
final	$0{,}15 - x_f$	excès	x_f	x_f
maximal	$0{,}15 - x_{max}$	excès	x_{max}	x_{max}

26 2.

Équation	$Cd(s) + 2\,Ag^+(aq) \rightarrow Cd^{2+}(aq) + 2\,Ag(s)$			
État	n_{Cd}	n_{Ag^+}	$n_{Cd^{2+}}$	n_{Ag}
initial	0,27	0,038	0,038	0,28
intermédiaire	$0{,}27 - x$	$0{,}038 - 2x$	$0{,}038 + x$	$0{,}28 + 2x$
maximal	$0{,}27 - x_{max}$	$0{,}038 - 2x_{max}$	$0{,}038 + x_{max}$	$0{,}28 + 2x_{max}$

29 1.

Équation	$C_2H_4O_2(\ell) + C_5H_{12}O \rightleftarrows C_7H_{14}O_2(\ell) + H_2O(\ell)$			
État	n_{acide}	n_{alcool}	n_A	n_{eau}
initial	1,0	1,0	0	0
intermédiaire	$1{,}0 - x$	$1{,}0 - x$	x	x
final	$1{,}0 - x_f$	$1{,}0 - x_f$	x_f	x_f
maximal	$1{,}0 - x_{max}$	$1{,}0 - x_{max}$	x_{max}	x_{max}

34 1. Transformation A

Équation	$C_2H_4O_2 + C_5H_{12}O \rightleftarrows C_7H_{14}O_2 + H_2O$			
État	n_{acide}	n_{alcool}	n_{ester}	n_{eau}
initial	0,25	0,20	0	0
intermédiaire	$0{,}25 - x$	$0{,}20 - x$	x	x
final	$0{,}25 - x_f$	$0{,}20 - x_f$	x_f	x_f
maximal	$0{,}25 - x_{max}$	$0{,}20 - x_{max}$	x_{max}	x_{max}

1. Transformation B

Équation	$C_2H_4O_2 + C_5H_{12}O \rightleftarrows C_7H_{14}O_2 + H_2O$			
État	n_{acide}	n_{alcool}	n_{ester}	n_{eau}
initial	0,30	0,15	0	0
intermédiaire	$0{,}30 - x$	$0{,}15 - x$	x	x
final	$0{,}30 - x_f$	$0{,}15 - x_f$	x_f	x_f
maximal	$0{,}30 - x_{max}$	$0{,}15 - x_{max}$	x_{max}	x_{max}

Crédits photographiques

1re de cour : © SPL • **1re de couv :** © Yanlu Liu/SHUTTERSTOCK • **p. 7 :** © GrenLob/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 16 g :** © Sami Sarkis Concepts / Alamy Stock Photo/REMIS • **p. 16 htm :** © Grzegorman Images • **p. 18 mg :** Ph. Coll. Archives Larbor • **p. 18 ht d :** © MPI/© IMAGE • **p. 18 bt g :** Ph. Coll. Archives Larbor • **p. 20 :** © Jose Nicmela • **p. 27 m g :** © Marco Ulomi/SHUTTERSTOCK • **p. 28 g :** Droits Réservés • **p. 29 ht d :** © Pascal Boudier/PHOTONONSTOP • **p. 29 ht g :** Droits Réservés/Agefotostock • **p. 31 ht g :** © Simon Gaertner/VREA • **p. 31 bas d :** © Eivanan/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 33 ht d :** © Albert Simsons-Ch HUE.CPA/Défense • **p. 33 bas d :** © Rawpixel.Ph/SHUTTERSTOCK • **p. 34 bas d :** © Sami Sarkis Concepts / Alamy Stock Photo/REMIS • **p. 34 ht d :** © Fejaviki/Wikimedia/Droits Réservés • **p. 35 ht g :** © S. Maniouloux • **p. 35 mg :** © Cnr Magnan/Alamy/HEMIS • **p. 36 btd :** © Bernad Sas/SHUTTERSTOCK • **p. 36 bas g :** © Ecpsy/SHUTTERSTOCK • **p. 38 ht d :** © Undesan/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 39 bas d :** © Picsat/ISTOCK • **p. 40 g :** © Dominique Delfino/BIOSPHOTO • **p. 40 d :** © Philippe Guignard • **p. 44 m d :** © Bokgatsi/GALERIMAGE • **p. 44 htd :** © Kamnaz/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 56 :** © Archives Corbis.org • **p. 58 :** © Philippe Guignard • **p. 59 :** © Valentin Coltru/Photograph Ent. republicain/MAXPPP • **p. 63 :** © Andrew Jacobs/SHUTTERSTOCK • **p. 64 d :** © Goodluz/SHUTTERSTOCK • **p. 66 :** © Cythoch • **p. 67 ht g :** © Nmedia/SHUTTERSTOCK • **p. 67 g :** © Moving Moment/SHUTTERSTOCK • **p. 79 bas d :** © Twinfire • **p. 82 ht g :** © C'est qui le patron ?! • **p. 82 :** © Gaelle/SHUTTERSTOCK • **p. 83 :** © S. Maniouloux • **p. 84 m g :** © Scanrail/ISTOCK • **p. 86 ht g :** © Valery Odaenko/SHUTTERSTOCK • **p. 85 ht g :** Domaine public/Pxhere.com • **p. 86 :** © Nilpo/SHUTTERSTOCK • **p. 87 :** © Dmf. © SHUTTERSTOCK • **p. 88 d :** © ISTOCK • **p. 90 :** © IcaroMADOBE STOCK PHOTO • **p. 99 :** © K. Simard/CORBIS • **p. 100 :** Droits Réservés • **p. 102 :** © AFP • **p. 104 :** © Mathieu Sug/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 105 :** © Magdiscs/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 106 ht g :** © Sanchouret, Daniel/SHUTTERSTOCK • **p. 106 bas d :** © ISTOCK • **p. 106 bas g :** © Irina Denysiuk/SHUTTERSTOCK • **p. 110 :** © www.chateaudefrant.com • **p. 111 :** © Dorsdorf/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 112 d :** © Microgen/SHUTTERSTOCK • **p. 114 htg :** © Simon Lane/Alamy/HEMIS • **p. 116 bas d :** © Stéphanie Duchêne/VAPN • **p. 116 m :** © Daniel Lebée/Musée du Louvre, Dist. RMN-Grand Palais • **p. 116 m ht :** © Rafael Ben Ari/Alamy/HEMIS • **p. 117 ht g :** © OMSP/BSIP • **p. 117 d :** © OMSP/BSIP • **p. 120 :** © Wikiphoto/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 124 :** © Nattrass/ISTOCK • **p. 125 :** © BPhotos/SHUTTERSTOCK • **p. 126 ht g :** © Tuphotography.com/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 126 bas d :** © AP/SIPA PRESS • **p. 127 :** © CBA/Alamy/HEMIS • **p. 128 :** © Burger/PHANIE • **p. 129 :** © Andrey Popov/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 130 :** © Microgen/SHUTTERSTOCK • **p. 131 bas g :** © Jean-Claude Manoli/camarat.com • **p. 131 bas d :** © Dr Mike Baird/Wikimedia • **p. 132 m :** © Centre Jean Perrin/LSM • **p. 132 bas d :** © Rue Fragonard/Centre hospitalier de Luxembourg • **p. 132 m :** © Centre Jean Perrin/LSM • **p. 132 bas g :** © Centre Jean Perrin/LSM • **p. 133 bas d :** © NASA • **p. 133 ht g :** © Sasamoto.stef/LEEMAGE • **p. 135 :** © Burger/PHANIE • **p. 135 :** © Burger/PHANIE • **p. 136 bas g :** © Bonte et Scanrail/SPL • **p. 136 bas d :** © Hubert Raguet/IT MC-Image/CNRS • **p. 137 :** © JLB.IN • **p. 140 htd :** © Kotomi Daoma/SHUTTERSTOCK • **p. 140 bas g :** © LH-DK/SHUTTERSTOCK • **p. 142 :** © ISTOCK • **p. 148 :** © Wladimirov/SHUTTERSTOCK • **p. 149 :** © Xiaocheng Chen/Département de chimie moléculaire/Université de Grenoble/CNRS • **p. 150 :** © Photka/SHUTTERSTOCK • **p. 152 g :** © Cokacz Malkiewicz/SHUTTERSTOCK • **p. 152 m :** © Nadia AF Sa/SHUTTERSTOCK • **p. 153 mg :** © Phanthep Khaidoi/Nattawoot/SHUTTERSTOCK • **p. 153 d :** © Sheila Terry/SPL • **p. 154 :** © Hubert Raguet/IT MC-Image/CNRS • **p. 155 :** © ADOBE STOCK PHOTO • **p. 156 :** © Medioffa Edimages/Alamy/HEMIS • **p. 158 :** © SPL • **p. 159 bas g :** © Maksim Ik/SHUTTERSTOCK • **p. 159 bas d :** © Dalia. M Ennes/SHUTTERSTOCK • **p. 160 bas :** © Marut Chinsa// SHUTTERSTOCK • **p. 160 d :** © Arnulf/ISTOCK • **p. 164 :** © EDMOT • **p. 166 :** © GREY-HERLIN • **p. 174 :** © Raphael Hamspire/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 180 ht d :** © Karol Kallas/SHUTTERSTOCK • **p. 180 bas d :** © Popp-design/ISTOCK • **p. 182 :** © Ben Mears/LOOK AT SCIENCES • **p. 184 :** © Gina Sosko/SHUTTERSTOCK • **p. 185 :** © Starstuff/SHUTTERSTOCK • **p. 186 bas g :** © Icon/SHUTTERSTOCK • **p. 186 d :** © Ekonat: Doe ! par HD Dynamics • **p. 189 :** © Pierre Marchal/LOOK AT SCIENCES • **p. 194 ht d :** © Dmitry Tolkushkin/AFP • **p. 194 bas d :** © Gustavo Frazao/ISTOCK • **p. 194 m :** © EMIN • **p. 199 ht g :** © Maximilian Stock/SPL • **p. 199 bas d :** © Heinrich Vnok • **p. 200 ht d :** © Bubble McClure/FREEDOM/VREA • **p. 200 bas d :** © Pete Niesen/SHUTTERSTOCK • **p. 201 :** © Panamarenko Alexander/SHUTTERSTOCK • **p. 202 :** © NASA • **p. 203 ht g :** © Claude Gravelines/SHUTTERSTOCK • **p. 203 bas d :** © Clement One ! par HD Dynamics • **p. 204 :** © Xavier Popy/VREA • **p. 209 m g :** © PictureLux/The Hollywood Archives/Alamy/REMIS • **p. 209 bas g :** © Photo12/AFP/SHUTTERSTOCK • **p. 204 :** © Smileus/SHUTTERSTOCK • **p. 207 :** © Oleksiy Mark/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 208 d :** © Dean Hindmarch/ISTOCK • **p. 210 :** © Science&Science/Alamy/REMIS • **p. 219 :** © Ideenexplosion/SHUTTERSTOCK • **p. 223** Droits Réservés • **p. 225 :** © J.Wonit History Archives/Alamy/REMIS • **p. 226 ht g** Domaine Public/Pixabay • **p. 226 :** © Dean Hindmarch/ISTOCK • **p. 231 :** © David Ramos/GPA/Picture-Alliance/AFP • **p. 233 :** © Popular Science/GETTY IMAGES • **p. 234 :** © Jacques Pierrot/RMN • **p. 236 :** © Pitris/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 242 :** © Svartkatt/SHUTTERSTOCK • **p. 244 d :** © Milos Muller/ISTOCK • **p. 246 :** © Daniel Thiouner/BPA/Picture-Alliance/AFP • **p. 248 ht g :** © Alex Livesey/Getty Images FW UANP • **p. 248 bas d :** © GOOGLE EARTH • **p. 248 ht d :** © Image Spot/Nasa • **p. 254 :** © Don Hammond/GETTY IMAGES • **p. 255 :** © www.jason-mendoza.org • **p. 257 :** © A. Le Floc'h/VESA • **p. 258 :** © Elizaveta Galitskaia/SHUTTERSTOCK • **p. 259 :** © Nikolai Ivko Vasilevskaia/Alamy/REMIS • **p. 260 ht d :** © Dyrkacz Mateusz de CIGARES-ARMATEURS.ESA • **p. 260 bas d :** © Tagy/SHUTTERSTOCK • **p. 261 :** © Maximilian Stock/ISTOCK • **p. 262 htg :** © Lucidone/SHUTTERSTOCK • **p. 262 bas d :** © Alexandra Lande/ISTOCK • **p. 264 :** © Y_Cantor/ISTOCK • **p. 265 ht d :** © Malchik/ISTOCK • **p. 267 :** © Anne Christine Poujoulat/AFP • **p. 268 d :** © Chinese/SHUTTERSTOCK • **p. 270 :** © Stuart Westmorland/Alamy/REMIS • **p. 270 :** © WS/SHUTTERSTOCK • **p. 276 ht :** © Bibliothèque Cantonale d'Entrance • **p. 276 bas :** © Technotr/ISTOCK • **p. 276 m :** © Yanlev_d/SHUTTERSTOCK • **p. 277 ht g :** © Lyagunov/SHUTTERSTOCK • **p. 279 bas d :** © NASA • **p. 279 ht d :** © Evan Kalraso/Corbis/SHUTTERSTOCK • **p. 279 bas g :** © Glenka/ISTOCK • **p. 280 :** © Sean M. Haffey/Getty Images/AFP • **p. 281 :** © David Madison/Exotica/GETTY IMAGES • **p. 282 :** © Valentinrussanov.php/SHUTTERSTOCK • **p. 286 :** © Chinese/SHUTTERSTOCK • **p. 287 :** © Elena Larina/SHUTTERSTOCK • **p. 291 :** © Gérard Lacz/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 291 bas d :** © CAMPAGNE PUBLICITE • **p. 291 d :** © M. Le Floc'h/VESA • **p. 294 :** © Nicolas Tavernier/VREA • **p. 300 :** © CERN • **p. 303 bas g :** © Cortis Paul/Alamy/HEMIS • **p. 303 htd :** © Musee de Rizoli/Getty Image 2012/AFP • **p. 304 :** © 2008 14_VILLARD • **p. 305 :** © Anthony Hartley/Alamy/HEMIS • **p. 308 ht g :** © Benoit Martinez/Getty IMAGES • **p. 308 bas :** © Benoit Martinez/SHUTTERSTOCK • **p. 309 :** © Maksim/SHUTTERSTOCK • **p. 310 htg :** © Hulton-Archives/GETTY IMAGES • **p. 310 bas d :** © A. Le Floc'h/ESA • **p. 310 m d :** © Age Fotostock/Alamy/REMIS • **p. 312 ht g :** © PYBA/Wikimedia/DROITS RESERVES • **p. 312 d :** © Getty Images/GETTY IMAGES • **p. 313 :** © Kyoto News Stills/GETTY IMAGES • **p. 314 :** © Sitara • **p. 315 :** © Microgen/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 316 bas g :** © JPL-Caltech/Space Science Institute/NASA • **p. 316 d :** © Andrey Armyagov/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 320 :** © Jerry Lodriguss/SPL • **p. 321 :** © Jet Propulsion Laboratory/NASA • **p. 322 :** © ESFU/LEEMAGE • **p. 324 :** © J. Huot/ESA • **p. 327 :** © JPL Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA/SPL • **p. 330 htg :** © Van Ravenswaay Claudius/SPL • **p. 330 bas g :** © NASA/SPL • **p. 331 :** © Jerry Lodriguss/SPL • **p. 333 :** © NASA/SPL • **p. 334 g :** © Rhea by Kevin/ESA • **p. 334 bas d :** © Andrey Armyagov/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 336 :** © ESO • **p. 337 :** © Centre Van Koevenovoy/NASA/SPL • **p. 339 :** © Laurent Conrod/VREA • **p. 340 bas g :** © Vadimir Mikhail/SHUTTERSTOCK • **p. 340 d :** © Xavi Bou/NaPPi MEDIA • **p. 340 bas d :** © Ingenieur/SHUTTERSTOCK • **p. 342 :** © Romain Thomas/SHUTTERSTOCK • **p. 344 :** © Africa Studio/SHUTTERSTOCK • **p. 345 ht d :** © Photo.ua/SHUTTERSTOCK • **p. 345 bas g :** © Marilia Iversin/AFP/STOCK • **p. 347 :** © Yipeng/SHUTTERSTOCK • **p. 348 :** © Universe/MIT • **p. 351 :** © Bill Bachman/Kelly Richardson Barnes/MASI • **p. 352 :** © Bruno_Burnet/SHUTTERSTOCK • **p. 354 :** © Julia Fekan/MAXPPP • **p. 355 :** © NASA • **p. 356 :** © Polygon/SHUTTERSTOCK • **p. 357 :** © Mauvieux/SHUTTERSTOCK • **p. 358 g :** © Flavio Fetrini/SHUTTERSTOCK • **p. 358 bas d :** © Eivanan/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 359 :** © Pixabay • **p. 360 :** © Michele Dwyer/Alamy/REMIS • **p. 361 :** © Fotokalvin/SHUTTERSTOCK • **p. 363 :** © Gennadiy Poznyakov/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 364 :** © NASA • **p. 365 :** © Jung Hoon Joy/AFP • **p. 366 :** © R&P Photo Studio/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 368 :** © Matthias Schrader/AP/SIPA PRESS • **p. 370 htg :** © NASA • **p. 370 bt d :** © NASA • **p. 370 m htd :** © NASA • **p. 370 m bg :** © NASA • **p. 374 :** © Kristina Postnikova/SHUTTERSTOCK • **p. 376 bas g :** © P. Stoppa/Alamy/HEMIS • **p. 376 d :** © Fred Marroux/RIA • **p. 386 bas g :** © Suje/SHUTTERSTOCK • **p. 386 bas d :** © Eric-n/SHUTTERSTOCK • **p. 387 :** © Iconic Images/Alamy/REMIS • **p. 388 :** © Mysticgraphicsmc/ISTOCK • **p. 389 g :** © Evolution/Alamy/REMIS • **p. 389 d :** © Jakub Kaczmarczyk/SHUTTERSTOCK • **p. 391 g :** © CLA • **p. 391 :** © Fred Marroux/RIA • **p. 393 :** © Pascal Lauschke/EPHMAG/BIS • **p. 395 :** © Hamilton/VREA • **p. 396 d :** © DOBLAMEISTOCK • **p. 396 m d :** CC Defense gov/DS • **p. 398 mg :** © Carolyn Franks/SHUTTERSTOCK • **p. 398 bas d :** © V. Yakobchuk/SHUTTERSTOCK • **p. 398 bas g :** © Kayal/PRISHUTTERSTOCK • **p. 398 m d :** © Andrey_Popov/SHUTTERSTOCK • **p. 401 :** © National Portrait Gallery – Archives Larbor • **p. 402 :** © Roman Sigaev/SHUTTERSTOCK • **p. 403 :** © Peter Malyushev/SHUTTERSTOCK • **p. 404 ht d :** © Kirill Vinkovov/SHUTTERSTOCK • **p. 404 m :** © Dmitry Tolkushkin/SHUTTERSTOCK • **p. 405 :** © Nagy-Bakody Arpad/SHUTTERSTOCK • **p. 409 :** © Telephotostudio/DREAMSTIME • **p. 410 :** © Alex Gibson/Alamy/HEMIS • **p. 412 :** © Kessia/SHUTTERSTOCK • **p. 413 ht g :** © Lauri Patterson/ISTOCK • **p. 413 bas d :** © Jaromir Chalabala/SHUTTERSTOCK • **p. 415 ht g :** © AsarbeeADOBE STOCK PHOTO • **p. 415 ht d :** © MarcoEbanoro/SHUTTERSTOCK • **p. 416 :** © DoBeARTISTOCK • **p. 417 :** © Nicoscopa/SHUTTERSTOCK • **p. 419 :** © Fersat/SHUTTERSTOCK • **p. 420 :** Droits Réservés • **p. 421 :** © Dipixel Brasil/BRA • **p. 423 :** © Ciptapix/SHUTTERSTOCK • **p. 424 :** © Charnes/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 426 :** © Lycée Jacques Prévert/REA • **p. 427 :** © Paul Almasy/AKG-Images • **p. 428 d :** © Monkey Business/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 430 ht d :** Domaine Public/Pxhere.com • **p. 436 :** © Martin Bond/SPL • **p. 437 :** © Jerry Sheila/SPL • **p. 441 :** © Nehriy/SHUTTERSTOCK • **p. 442 mg :** © Andrew Lambert/SPL • **p. 443 :** © Joel Sackin/SHUTTERSTOCK • **p. 446 :** © World History/AKADA PRESS • **p. 448 :** © Monkey Business/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 451** © Andrew Lambert/SPL • **p. 452 htg :** © ADOBE STOCK PHOTO • **p. 452 ht m :** © S.BELVEDERE • **p. 453 :** © Andreas/ISTOCK • **p. 454 d :** © Bokgatsi/Galerimage • **p. 454 bas g :** © Andrey_Popov/SHUTTERSTOCK • **p. 456 ht d :** © Alex Cosa/Novapix/LEEMAGE • **p. 458 :** © Novapix/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 459 :** © Jean-Baptiste FOLLMANN • **p. 460 :** © E. Pierre Novapix/LEEMAGE • **p. 460 bas :** © Geneviève Tallon • **p. 465 :** © Stockdisk • **p. 466 :** © Lindsay Costner/SHUTTERSTOCK • **p. 467 :** © Susan Candelaria/AGE FOTOSTOCK • **p. 468 :** © NASA • **p. 471 ht d :** Domaine public • **p. 472 ht d :** © F. Masero / Longview.org • **p. 472 m d :** © F. Masero / Longview.org • **p. 472 ht g :** © F. Masero / Longview.org • **p. 473 ht d :** © Alex_Stansfield/SHUTTERSTOCK • **p. 473 g :** © Bvs • **p. 473 :** © Cyril Frésillon/CNRS/ CNRS • **p. 476 g :** © Vierlka/ISTOCK • **p. 476 d :** © Black Jack/STOCK • **p. 478 ht d :** © Sébastien Rondeau/Droits Réservés • **p. 478 m :** © PHYSIO, Université de Liège • **p. 479 ht g :** © Domaine public/ISTOCK • **p. 479 ht d :** © Patrick Rosagro/SHUTTERSTOCK • **p. 479 ht m :** © Andrey Suslov/ISTOCK • **p. 480 :** © Rhoberton/ISTOCK • **p. 481 :** © SPL • **p. 487 :** © Olgha/ISTOCK • © Alamy/REMIS • **p. 489 :** © Austin Dean Photography/SHUTTERSTOCK • **p. 490 :** © Smileus/ISTOCK • **p. 492 :** © BlackJack3D/ISTOCK • **p. 493 :** © SPL • **p. 494 :** © Victor_Gladkov/ISTOCK • **p. 496 :** © inf. 21 1020-2010/CERN • **p. 497 :** © Gennadiy/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 498 mg :** © Lourens Smak/Alamy/HEMIS • **p. 498 d :** © Andrey Popov/Alamy/HEMIS • **p. 500 bt g :** © 2008 14_VILLARD • **p. 500 ht d :** © Swetlyi Pixs/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 502 :** © MJ Images/Alamy/HEMIS • **p. 510 mg :** © Photoboyko/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 510 ht d :** © Kim Christensen/SHUTTERSTOCK • **p. 511 :** © Bridgeman Images/DR/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 515 :** © Photo RMN-Gérard Blot/Musée des Arts et Métiers-CNAM, Paris • **p. 516 bt g :** © John Sohlden/Alamy/HEMIS • **p. 516 bas d :** © Andrey Popov/Alamy/HEMIS • **p. 516 bas g :** © Steve Gschmeissner/SHUTTERSTOCK • **p. 517 ht d :** © Alexandre Gdebar/VREA • **p. 517 bas g :** © Mor Gali/SHUTTERSTOCK • **p. 518 :** © Bas Vanden Bossche/GETTY IMAGES • **p. 521 :** © Smileyjeksteve/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 524 :** © Stanislav Vlaskin/ADOBE STOCK PHOTO • **p. 527 :** © Rachevin/ISTOCK • **p. 528 :** © SPA PRESS • **p. 566 :** © TEXAS INSTRUMENTS • **p. 567 :** © CASIO • **p. 568 :** © Numeworks • **p. 591 :** © JULIEN

Photographies non référencées : Philippe Guignard/Delagrange - Centre de Production

Les droits de reproduction des illustrations sont réservés et notre comptabilité pour les auteurs ne soient droit étant nous d'avoir pas trouvé les coordonnées malgré nos recherches et dans les cas éventuels où les mentions n'auraient pas été spécifiées.

Animations : © eduMedia

Crédits vidéos : p. 314 Lancer de balle © SEARA – p. 458 bas © Geneviève Tallon – p. 478 m © PHYSIO, Université de Liège

Vidéos gestes ECE « les deux vidéos "Réaliser une pile" et "Mettre en œuvre une électrolyse de l'eau" : © Nicolas Blanayre • Idée "Utiliser un logiciel de pointage" : © Eurosmart/v2i © Nicolas Blanayre

Vidéos p. 347 et p. 367 © Cédric Vial

Remerciements

Les auteurs et les éditions Bordas remercient la société Joulin pour le prêt de matériel de laboratoire. Ils remercient également Patrice Bousquet, proviseur du lycée Dhuoda à Nîmes, pour son accueil lors de la réalisation des photos d'expérience.

Direction éditoriale : Julien Barret

Responsable éditoriale : Christelle Legueurs

Édition : Soumaya Mantoudjaa et Alexandre Siedzejew

Compagnonnage et schémas : STDI

Conception graphique : Frédéric Joly et Delphine Quelchot

Correction et traduction en anglais : Global Voices

Iconographie et recherche des vidéos : Nathalie Lasserre

Coordination artistique : Pierre Taillemite

Fabrication : Jean-Philippe Dore

Conception de la couverture : Fann Collin

Deuxième loi de Newton

$$\sum \vec{F}_{\text{extérieur/système}} = m\,\vec{a}_G$$

- $\sum \vec{F}_{\text{extérieur/système}}$: résultante des forces
- m : masse du système
- $\vec{a}_G$: accélération du centre de masse

Équilibre d'un système

$$\vec{v}_G = \vec{0} \rightarrow \sum \vec{F}_{\text{extérieur/système}} = \vec{0}$$

Énergie mécanique

$$E_m = E_c + E_p$$

- E_m : énergie mécanique (en J)
- E_c : énergie cinétique (en J)
- E_p : énergie potentielle (en J)

Énergie cinétique

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

- E_c : énergie cinétique (en J)
- m : masse (en kg)
- v : vitesse (en $m \cdot s^{-1}$)

Travail d'une force

$$W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB} = F \cdot AB \cdot \cos\alpha$$

- $W_{AB}(\vec{F})$: travail de la force entre A et B (en J)
- $\cdot$: produit scalaire
- AB : longueur (en m)
- F : intensité de F (en N)
- α : angle α formé par $\vec{F}$ et $\overrightarrow{AB}$ (en °)



Troisième loi de Kepler

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M} = \text{constante}$$

- T : période de révolution (en s)
- a : demi-grand axe (en m)
- G : constante universelle de gravitation $G = 6{,}67 \times 10^{-11}\ m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$
- M : masse de l'astre attracteur (en kg)

Force électrique

$$\vec{F}_e = q \cdot \vec{E}$$

- $\vec{F}_e$: force électrique de valeur F_e (en N)
- q : charge électrique (en C)
- $\vec{E}$: champ électrique de valeur E (en $V \cdot m^{-1}$)

Champ électrique dans un condensateur plan

$$E = \frac{U_{AB}}{d}$$

- E : champ électrique (en $V \cdot m^{-1}$)
- U_{AB} : tension entre les deux armatures A et B (en V)
- d : distance entre les armatures (en m)

Énergie potentielle de pesanteur

$$E_{pp} = m \cdot g \cdot y$$

- E_{pp} : énergie potentielle de pesanteur (en J)
- m : masse (en kg)
- g : intensité de la pesanteur (en $m \cdot s^{-2}$)
- y : altitude (en m)

Énergie potentielle électrique

$$E_{pe} = q \cdot V$$

- E_{pe} : énergie potentielle électrique (en J)
- q : charge électrique (en C)
- V : potentiel électrique (en V)

Théorème de l'énergie cinétique

$$\Delta E_c = E_c(B) - E_c(A) = \sum W_{AB}(\vec{F})$$

- ΔE_c : variation d'énergie cinétique (en J)
- $\sum W_{AB}(\vec{F})$: somme des travaux des forces (en J)

Poussée d'Archimède

$$\vec{\pi} = -\rho_f \cdot V \cdot \vec{g}$$

- $\vec{\pi}$: poussée d'Archimède de valeur π (en N)
- ρ_f : masse volumique du fluide (en $kg \cdot m^{-3}$)
- V : volume du fluide déplacé (en m^3)
- $\vec{g}$: champ de pesanteur terrestre d'intensité g (en $N \cdot kg^{-1}$ ou $m \cdot s^{-2}$)

Débit volumique d'un fluide

$$Q = \frac{V}{\Delta t} = v \cdot S$$

- Q : débit volumique (en $m^3 \cdot s^{-1}$)
- V : volume de fluide écoulé (en m^3)
- Δt : durée de l'écoulement (en s)
- v : vitesse du fluide (en $m \cdot s^{-1}$)
- S : aire de la section du conduit (en m^2)

Relation de Bernoulli

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho \cdot g \cdot z = \text{constante}$$

- P : pression du fluide (en Pa)
- ρ : masse volumique du fluide (en $kg \cdot m^{-3}$)
- v : vitesse du fluide (en $m \cdot s^{-1}$)
- g : intensité de pesanteur (en $N \cdot kg^{-1}$)
- z : altitude (en m)

MIXTE Papier issu de sources responsables FSC® C022090

Bordas est un éditeur qui s'engage pour la préservation de l'environnement et utilise du papier issu de forêts gérées de manière responsable et d'autres sources contrôlées.

Ce livre a été imprimé en France en avril 2020 par BLG, imprimeur certifié Imprim'Vert

N° de projet : 10259732
Dépôt légal : avril 2020

POUR RÉVISER ET VOUS ENTRAÎNER, DANS VOTRE MANUEL

- Les **révisions** indispensables en début de chaque chapitre
- Plus de 800 exercices avec de nombreux exercices corrigés ou guidés pour se **préparer au Bac** en autonomie
- Un livret de 16 pages, des exercices et des pistes pour se préparer au **Grand oral**
- De nombreuses **fiches pratiques** et de **méthode**

bordas Flash PAGE

CE MANUEL EST AUGMENTÉ :
une application gratuite, pour un accès facile et rapide aux ressources numériques du manuel papier !

- 10 vidéos GESTE ECE pour maîtriser les bons gestes de l'épreuve expérimentale
- 32 animations et 9 vidéos
- Le cours en podcast DYS
- 20 QCM interactifs
- Les corrigés détaillés des exercices corrigés du manuel
- Des cartes mémo numériques pour réviser

Si vous n'avez pas de smartphone, certaines de ces ressources sont disponibles sur le **site élève** lycee.editions-bordas.fr



ET POUR ALLÉGER VOTRE SAC, CE MANUEL EXISTE AU FORMAT NUMÉRIQUE !

Pour en savoir plus, **editions-bordas.fr**

Pour vous entraîner et réviser à la maison



Le Tout en un : toutes les matières en un seul ouvrage

ISBN 978-2-04-733763-9

bordas éditeur

FSC DES FORÊTS POUR TOUS POUR TOUJOURS