

physique et chimie

seconde

collection eurin-gié

 HACHETTE
Classiques

nouvelle édition 87

physique et chimie

549.3
BAU

Seconde

collection eurin-gié

8.7
8.13
8-14
8-20

R. BAUTRANT
Lycée Thiers de Marseille

P. BRAMAND
Ecole militaire d'Aix-en-Provence

Ph. FAYE
Lycée Thiers de Marseille

A. JAUBERT
Lycée Thiers de Marseille

G. THOMASSIER
Lycée Thiers de Marseille

Nouvelle édition
conforme au programme 87
(B.O. du 5/2/87)



HACHETTE
Classiques

PROGRAMME

I. Électricité

1. Intensité et tension

1.1. Courant électrique continu : circulation des porteurs de charge, sens conventionnel du courant. Détermination du sens du courant et mesure de l'intensité d'un courant. Notion de quantité d'électricité.

1.2. Tension électrique, ou différence de potentiel entre deux points d'un circuit; sa mesure.

1.3. Existence de tensions variables.

2. Dipôles

2.1. Étude expérimentale des caractéristiques $u=f(I)$ et $I=g(u)$ de quelques dipôles passifs. Résistance d'un conducteur ohmique.

2.2. Associations de conducteurs ohmiques.

2.3. Étude expérimentale de la caractéristique $u=f(I)$ d'un générateur possédant une résistance interne. Force électromotrice.

2.4. Branchement d'un conducteur ohmique sur une pile.

3. Réalisation d'un montage électronique

3.1. Analyse de la structure d'un dispositif électronique et indications sur la fonction de ses différents sous-ensembles : capteurs, dispositif électronique et alimentation, sortie.

3.2. Réalisation d'un montage simple utilisant un amplificateur opérationnel.

II. Mécanique

1. Le mouvement

Vecteur vitesse d'un point mobile.

2. La force

2.1. Action mécanique d'un système sur un autre.

2.2. Exemples d'actions mécaniques : forces de contact (frottement compris); poids d'un corps. Relation entre force appliquée et allongement d'un ressort.

2.3. Interaction.

3. Centre d'inertie — Quantité de mouvement

3.1. Mise en évidence expérimentale du centre d'inertie d'un corps solide. Principe de l'inertie.

3.2. Étude de l'éclatement d'un système isolé de deux solides; vecteur quantité de mouvement d'un solide. Conservation de la quantité de mouvement d'un système isolé.

3.3. Exemples de variation de la quantité de mouvement d'un système.

4. Équilibre d'un solide

Exemples d'équilibre d'un solide dans les seuls cas suivants :

— sous l'action de deux forces;

— sous l'action de trois forces non parallèles;

— sous l'action de deux forces appliquées, le solide étant susceptible de tourner autour d'un axe fixe.

III. Chimie

1. La matière et ses transformations

1.1. L'élément chimique.

a. Exemples de réactions chimiques.

b. Atome : électrons, noyau (protons et neutrons).

c. Classification périodique des éléments.

d. Molécule et liaison covalente.

e. Ions monoatomiques et polyatomiques.

1.2. Équation-bilan d'une réaction chimique

a. Équation-bilan; loi de Lavoisier.

b. Quantité de matière : mole; constante d'Avogadro.

c. Loi d'Avogadro-Ampère; volume molaire.

2. Les ions et les solutions aqueuses ioniques

2.1. Le chlorure de sodium.

a. Les ions dans un corps pur et dans sa solution aqueuse; rôle du solvant.

b. Électrolyse du chlorure de sodium fondu et de sa solution aqueuse.

2.2. Solutions acides, solutions basiques.

a. La solution d'acide chlorhydrique; l'ion H_3O^+ ; définition et mesure du pH.

b. La solution d'hydroxyde de sodium; pH de différentes solutions.

c. Réaction entre la solution d'acide chlorhydrique et la solution d'hydroxyde de sodium.

2.3. Tests d'identification de quelques ions.

Réalisation des schémas : Rémi Picard et Christiane Pérot.

ISBN 2-01.010886.8

© Hachette, 1987 — 79, boulevard St-Germain, F 75006 Paris.

La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

Préface

L'ouvrage, entièrement refondu, que nous présentons est conforme au Programme de la classe de Seconde paru dans le B.O. spécial du 5 février 1987.

Nous avons maintenu la présentation en un seul volume regroupant la Physique et la Chimie, montrant ainsi l'unité des Sciences physiques.

La rédaction a été simplifiée de manière à souligner l'essentiel, mais avec le souci de rester rigoureux. Un accent tout particulier a été mis sur les aspects expérimentaux. La mise en œuvre des expériences décrites fait ainsi l'objet de « **Fiches expérimentales** » susceptibles de favoriser la pratique des T.P.-cours. Également, quelques « **Fiches techniques** » ont pour but de familiariser les élèves avec les appareils ou le matériel qu'ils utilisent.

En Électricité, comme le prévoit le Programme, l'étude des dipôles est associée à la pratique du montage, qui est ainsi valorisée. L'amplificateur opérationnel en régime linéaire fait l'objet d'un chapitre particulier. La rédaction marque un souci de simplification, notamment en ce qui concerne l'algébrisation, qui reste modérée.

En Mécanique, conformément au Programme, la présentation de la notion de force vient assez tôt, de manière à faciliter la démarche en la rendant plus concrète grâce à des exemples variés.

En Chimie, on a insisté, là aussi, sur les aspects expérimentaux et une meilleure connaissance des corps cités ou utilisés.

Un soin tout particulier a été apporté pour favoriser la souplesse pédagogique ainsi qu'une bonne maîtrise du raisonnement et l'acquisition des connaissances. Nous avons augmenté le nombre des « **Applications résolues** » qui permettent à l'élève d'assurer pas à pas l'assimilation des notions qu'il rencontre. Une rubrique « **Faire le point** », en conclusion de chaque chapitre, propose un rapide questionnaire sur les éléments jugés fondamentaux. Enfin, de très nombreux exercices, qui représentent près du quart de l'ouvrage, variés quant à la forme et au contenu, sont proposés. Les plus difficiles d'entre eux sont repérés par un numéro de couleur.

Bien dissociées du cours proprement dit, quelques rubriques « **Pour aller plus loin** » permettent, si on le juge utile, un éventuel approfondissement. Enfin, des « **Documents** » apportent les ouvertures nécessaires.

Quant à la présentation de l'ouvrage, outre l'usage systématique des quatre couleurs, un soin tout particulier a été apporté dans la réalisation des schémas et dans le choix des illustrations. Nous espérons mettre ainsi à la disposition des élèves un ouvrage clair et agréable.

En terminant, nous souhaitons que cet ouvrage puisse aider nos collègues dans cet enseignement structuré, toujours délicat, des débuts des Sciences physiques, les cours donnés dans les collèges constituant une initiation. Nous accueillerons volontiers toutes suggestions, remarques et critiques de la part de nos collègues et, par avance, nous les en remercions.

Les Auteurs

Références photographiques

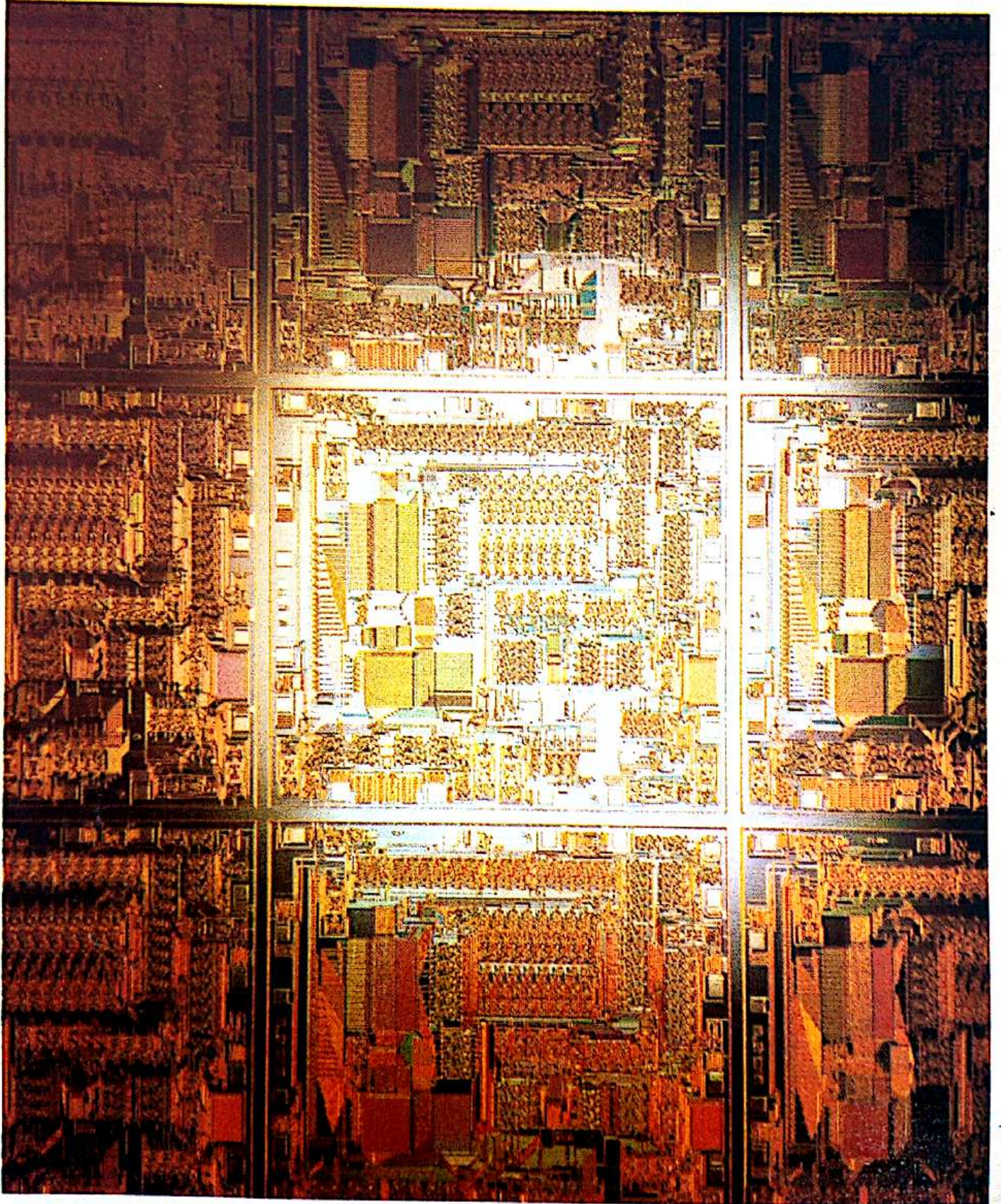
Couverture : « Molecule abstract », Steven Hunt — IMAGE BANK. 1. SEDITAS/THOMSON. 6. Accard — SODEL/E.D.F. 8. (de haut en bas et de gauche à droite) HACHETTE, THOMSON-C.S.F., BULLOZ. 15. Binz/F. Lane — RAPHO. 53. JEUMONT-SCHNEIDER. 75. (de haut en bas) Lespinasse — R.E.A./PHOTOWATT, J. Guichard — SYGMA. 120. (à gauche) SEDITAS/THOMSON. 125. SEDITAS/THOMSON. 129. P.P.P.-I.P.S. 137. (de haut en bas) A. Choynet — HACHETTE, E. Berne — FOTOGAM. 142. (de gauche à droite) D. Cannon — ALLSPORT, H. Szwarc. 143. H. E. EDGERTON. 147. (de haut en bas) G. Boutin — EXPLORER, J. Guillot — EDIMEDIA. 151. (de haut en bas) Van Looche — VLOO, CITROEN/D.R.P. 152. (de haut en bas) CHARLIAT-RAPHO, C. Morin — JERRICAN, IFREMER. 153. G. Vandystadt. 154. P.P.P.-I.P.S. 155. SOFRANIE/METTLER. 156. *On a marché sur la lune* — Hergé/Exclusivité CASTERMAN, JEULIN. 158. G. Vandystadt. 162. P.P.P.-I.P.S. 164. LAUROS-GIRAUDON. 165. (de gauche à droite) H. Chaumeton, AEROSPATIALE. 169. M. Martin. 170. M. Martin. 171. D. C. Heat — P.S.S.C. Physics. 172. Briquet. 174. C.N.D.P. 181. C.N.D.P. 186. C.N.D.P. 189. A.-P. French — W.W. NORTON. 190. (en haut) P.P.P.-I.P.S. 193. (de gauche à droite) C.F.P. — JERRICAN, H. Chaumeton. 197. (de gauche à droite) F. Boissière, P. Behar — VANDYSTADT. 200. A. Choynet. 203. D. Buisson — VANDYSTADT. 205. L. Salou — EXPLORER. 241. Société RUGGIERI. 242. (à gauche) N. Bariand. 248. (de haut en bas) H. Chaumeton — JACANA, J.-M. Labat — JACANA. 251. BOYER-VIOLLET. 252. California Institute of Technology et Carnegie Institution of Washington. 256. Bildarchiv d.Ost. Nationalbibliothek. 263. (de gauche à droite) HACHETTE, A. Zschau — GSI. 264. RHONE-POULENC. 267. HACHETTE. 268. P. Kérébel — DIAF. 270. J. Six. 272. N. Uyada/ Université de Kyoto. 282. (de gauche à droite) A. Choynet, Bérenguer — JERRICAN. 288. ELF. 289. A. Choynet. 290. HACHETTE. 292. P.P.P.-I.P.S. 296. J.-P. Bourret — PITCH. 300. (de gauche à droite) SOLVAY, N. Barian. 304. P.C.U.K. 314. A. Choynet — HACHETTE. 315. G. Champlong — IMAGE BANK. 324. Ch. Mahaux — EXPLORER. 347. (de haut en bas et de gauche à droite) Hayon — PITCH, A. Choynet — HACHETTE, J. Six, Carre — JACANA. 349. H. W. Silvester — RAPHO.

Photos non référencées : Studio DRAGACCI.

Table des matières

Électricité	1
1. Le courant électrique	2
2. Intensité du courant	14
3. Propriétés des courants	24
4. Tension	34
5. Existence de tensions variables	48
6. Conducteurs ohmiques	56
7. Caractéristique d'une pile	70
8. Lois d'associations	78
9. Point de fonctionnement d'un circuit — Loi de Pouillet	86
10. Quelques montages électroniques simples	94
11. Le transistor et quelques applications	108
12. L'amplificateur opérationnel	120
Mécanique	129
13. Mouvement — Vitesse	130
14. Actions mécaniques	142
15. Quelques actions mécaniques — Poids d'un corps	150
16. Interactions	160
17. Mise en évidence expérimentale du centre d'inertie d'un solide	168
18. Quantité de mouvement d'un solide	180
19. Forces et variation de quantité de mouvement	190
20. Équilibre d'un solide soumis à deux forces	200
21. Équilibre d'un solide soumis à trois forces non parallèles	212
22. Moment d'une force par rapport à un axe	222
23. Équilibre d'un solide mobile autour d'un axe fixe	233
Chimie	241
24. Notion expérimentale d'élément chimique	242
25. Structure de l'atome	250
26. Structure électronique des atomes — Classification périodique des éléments	256
27. Vue d'ensemble sur les structures de la matière — Signification des formules	266
28. Les molécules — La liaison covalente	272
29. Expériences sur le soufre — Équation-bilan d'une réaction	282
30. Réactions entre gaz — Bilan volumique d'une réaction	292
31. Le chlorure de sodium	300
32. Les solutions aqueuses ioniques	308
33. L'acide chlorhydrique — Notion de pH	318
34. L'hydroxyde de sodium et sa solution aqueuse	328
35. Interaction entre les solutions d'acide chlorhydrique et d'hydroxyde de sodium	336
36. Solutions acides, solutions basiques	344
37. Tests d'identification de quelques ions	352
Réponses aux exercices	362

ÉLECTRICITÉ



1.

Le courant électrique

1.1 des électrons en mouvement dans le vide

1.1.1 observons un faisceau d'électrons

Dans le tube de verre de la photographie 1, la trace bleue sur la plaque est provoquée par un faisceau d'électrons. Ce tube de verre (appelé *tube de Crookes*) est pratiquement vide d'air et contient deux électrodes métalliques. Ces électrodes sont reliées à un générateur de haute tension.

1.1.2 l'électron

L'électron est une des particules fondamentales constituant la matière.

Sa masse est extrêmement faible :

$$m = 9,10953 \cdot 10^{-31} \text{ kg.}$$

L'électron est une particule chargée négativement; c'est un *porteur de charge*. Une charge électrique se mesure en coulombs (symbole : C).

La charge de l'électron est négative. Elle est égale à $q = -1,602189 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

A ce jour, aucune particule portant une charge inférieure en valeur absolue à cette valeur n'a été détectée; cette quantité représente la charge élémentaire notée e :

$$e = 1,602189 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

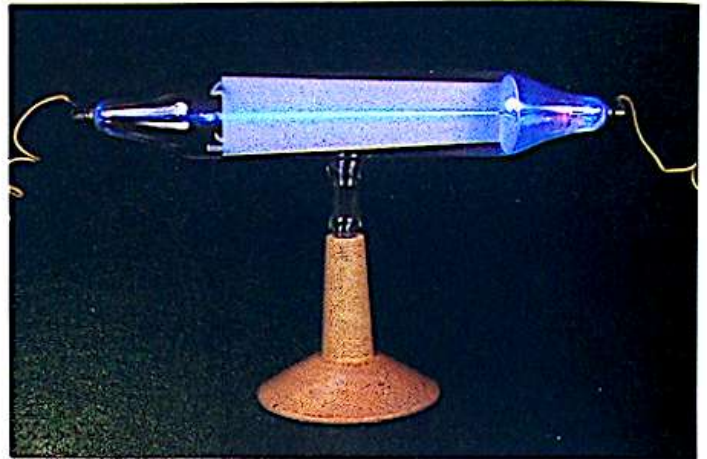
- La charge élémentaire vaut environ $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.
Un électron porte une charge élémentaire négative : $q = -e$.

1.1.3 d'où proviennent les électrons du faisceau?

En classe de 4^e, nous avons vu qu'un métal est formé à partir d'atomes constituant un édifice ordonné appelé cristal métallique.

Chaque atome comporte un noyau chargé positivement et un ensemble d'électrons. La somme algébrique des charges des électrons et de la charge du noyau est nulle : l'atome est électriquement neutre (voir chapitre 25).

Nous savons aussi qu'un métal possède des électrons non liés aux noyaux. Sous l'action d'une haute tension, certains de ces électrons peuvent être éjectés du métal qui constitue l'électrode reliée à la borne - du générateur.



1. Le tube de Crookes est une ampoule de verre dans laquelle on a fait un vide poussé, mais non total. L'une des électrodes émet des électrons, invisibles, qui se propagent en ligne droite. Le choc des électrons sur la plaque fluorescente ou sur le verre provoque une émission de lumière qui permet leur visualisation.

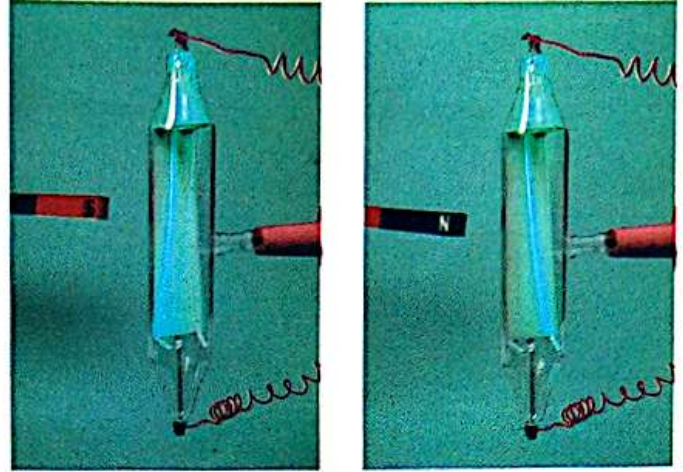
Ces électrons sont alors projetés dans le vide et forment un faisceau invisible. Leurs chocs sur le verre ou sur la peinture luminescente d'un écran provoque une émission de lumière qui permet de visualiser leur trace.

1.1.4 dévions un faisceau d'électrons

Approchons du tube de Crookes l'un des pôles d'un aimant.

Le faisceau d'électrons subit une déviation (photo 2).

- Des porteurs de charge en mouvement peuvent être déviés par action magnétique.

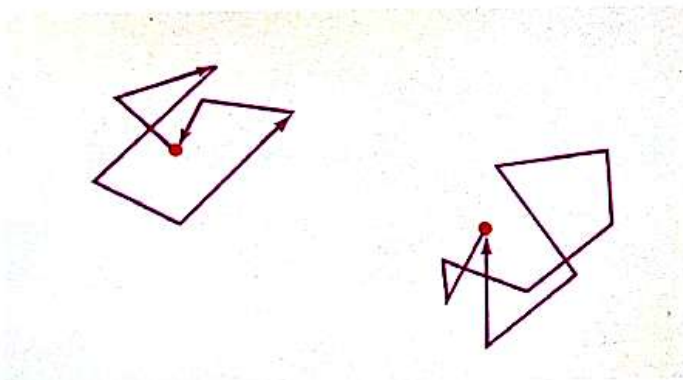


2. Un aimant provoque la déviation du faisceau d'électrons. La position de l'aimant par rapport au faisceau fait varier l'importance et le sens de la déviation.

1.2 des électrons en mouvement dans un métal

1.2.1 conduction métallique

Dans un métal, les électrons non liés se déplacent d'une façon désordonnée(*). Cette agitation dans toutes les directions est analogue à l'agitation thermique des molécules d'un gaz.



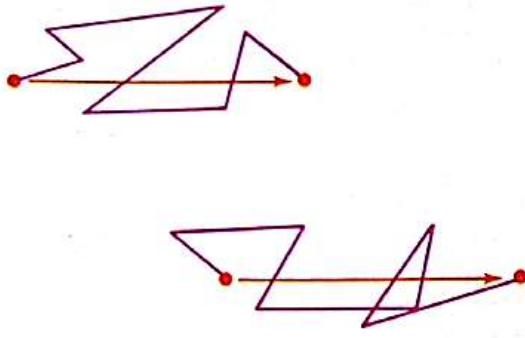
3 a. Mouvement désordonné d'électrons dans un métal.

Entre deux chocs successifs, leur vitesse peut atteindre $2000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Comme ils vont tantôt dans une direction, tantôt dans une autre, sans préférence, leur déplacement moyen est nul.

Nous avons vu dans les classes antérieures qu'un courant électrique dans un métal est un déplacement ordonné d'électrons. Ce mouvement d'ensemble(**), provoqué par un générateur placé dans le circuit électrique, se



(*) Comme des élèves dans une cour de récréation.
 (**) Comme des coureurs lors d'un cross ou des élèves au moment de la sonnerie lorsqu'ils se dirigent vers leur salle de classe.



3b. Lorsqu'un courant circule, un mouvement d'ensemble se superpose au mouvement désordonné des électrons.

superpose au mouvement désordonné. Il s'effectue très lentement, à la vitesse de quelques millimètres par seconde seulement. Mais lorsqu'on ferme l'interrupteur d'un circuit, l'ordre de « mise en marche » est transmis à la vitesse fantastique d'environ $300\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.



1.2.2 expérience

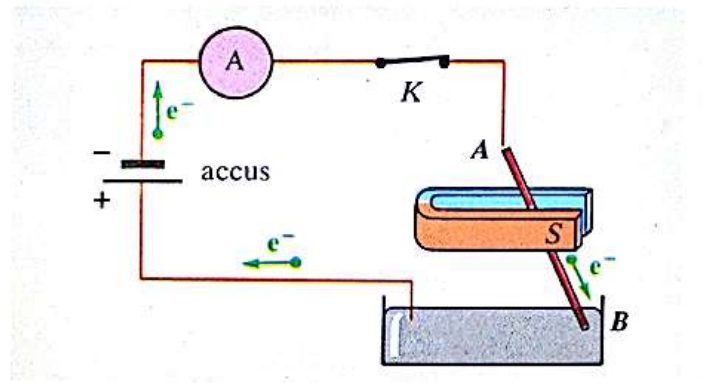
Dans le circuit schématisé figure 4, le fil de cuivre rigide AB est articulé en A . Son autre extrémité B est en contact avec du mercure, métal liquide, conducteur. Le fil AB peut prendre différentes inclinaisons sans que le circuit soit coupé. Il est initialement vertical.

Approchons un aimant en U comme l'indique la figure (pôle sud de l'aimant vers l'avant).

Lorsque le courant passe, le fil est repoussé vers la droite. Ouvrons l'interrupteur : l'aimant est sans action sur le fil lorsque le courant ne passe pas.

Dans le tube de Crookes les électrons en mouvement sont déviés par un aimant.

Dans le fil métallique AB , les électrons en mouvement constituant le courant tendent à être déviés de la même façon par l'aimant. Ne pouvant pas, malgré tout, sortir du fil de cuivre, ils lui transmettent l'action qu'ils subissent.



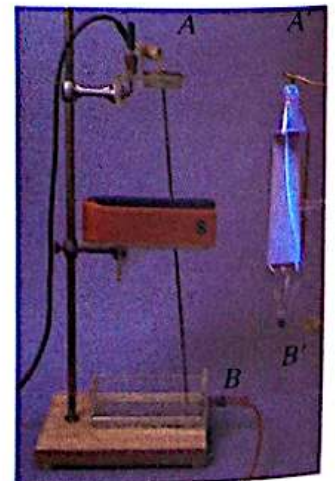
4. Le conducteur AB est mobile autour de A . L'autre extrémité B plonge dans le mercure. Lorsque le courant passe dans le circuit, la présence de l'aimant provoque une déviation de la tige AB .

1.2.3 sens du courant

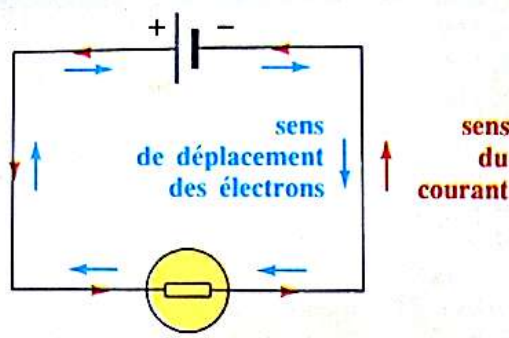
Pour une même position de l'aimant (photo 5), la déviation du faisceau d'électrons dans le tube de Crookes et celle du fil AB se font dans le même sens.

Le faisceau d'électrons va de A' vers B' .

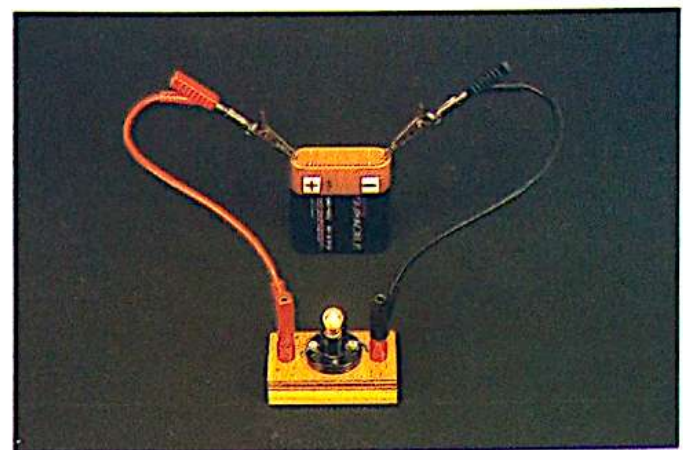
Le courant d'électrons dans le fil va donc de A vers B . Dans les autres éléments métalliques du circuit, les électrons circulent en sortant de la borne négative du générateur pour rejoindre, à travers le circuit conducteur, la borne positive.



5. Les électrons non liés qui se déplacent dans la barre AB sont déviés dans le même sens que ceux qui traversent le tube de Crookes.



6. La connaissance du signe des bornes du générateur entraîne celle du sens du courant à l'extérieur du générateur.



Fixé par Ampère à une époque (début du XIX^e siècle) où l'on ignorait totalement l'existence des électrons, le sens conventionnel du courant électrique est opposé au sens de déplacement des électrons.

- Dans un circuit électrique, le courant sort par convention de la borne + du générateur et entre par la borne -.
- Dans la chaîne conductrice métallique, le déplacement ordonné d'électrons s'effectue dans le sens opposé à celui du courant.
- Nous conviendrons de représenter le sens conventionnel du courant par une flèche placée sur le fil de jonction.

1.3 courant électrique dans les solutions

1.3.1 courant dans un électrolyte

Dans le montage de la figure 9 (voir fiche expérimentale, p. 7), A et C sont deux bâtonnets de graphite appelés électrodes; ils plongent dans une solution aqueuse de chlorure de cuivre II.

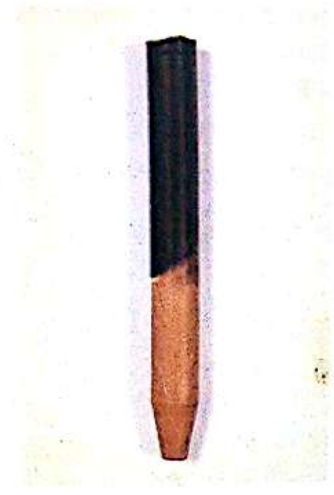
Lorsque l'interrupteur est fermé, l'ampèremètre dévie et la lampe brille : il y a passage du courant électrique. Le courant entre dans la solution par l'électrode A, appelée anode, et en sort par l'électrode C, appelée cathode. Une telle solution conductrice est un électrolyte.

Des réactions chimiques se produisent sur les électrodes. Leur interprétation (voir fiche expérimentale) conduit à conclure qu'au sein de la solution les ions positifs (ions cuivre II Cu^{2+}) se déplacent dans le sens anode vers cathode : c'est le sens du courant.

Les ions négatifs (ions chlorure Cl^-) se déplacent dans le sens opposé.

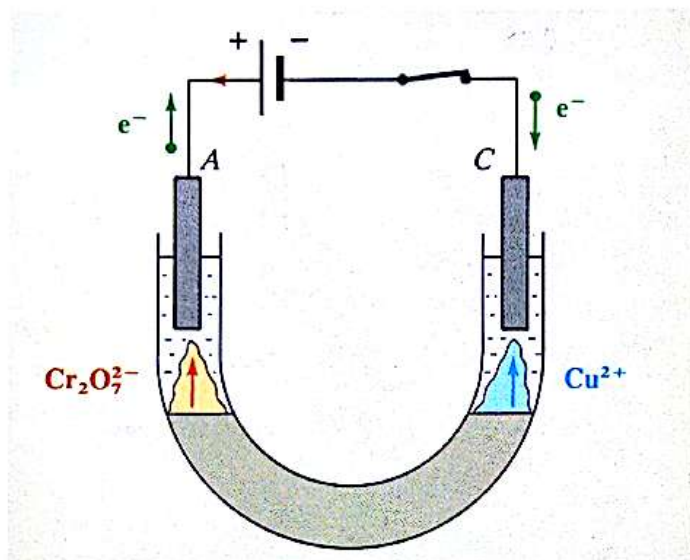
- Dans un électrolyte les porteurs de charges en mouvement sont des ions. Les ions positifs migrent dans le sens conventionnel du courant, les ions négatifs en sens opposé.

Dans un électrolyte les ions positifs, ici des ions cuivre II, se déplacent dans le sens conventionnel du courant : anode vers cathode, comme en témoigne le dépôt de cuivre qui s'est formé sur cette dernière.



1.3.2 mise en évidence directe de la migration des ions

Introduisons dans un tube en U (fig. 7) une solution aqueuse de dichromate de potassium (ions K^+ et $Cr_2O_7^{2-}$) et de sulfate de cuivre II (ions Cu^{2+} et SO_4^{2-}). Dans l'eau les ions dichromate $Cr_2O_7^{2-}$ sont orangés, les ions cuivre II Cu^{2+} sont bleus(*) ; les ions sulfate SO_4^{2-} et potassium K^+ sont incolores. Les ions $Cr_2O_7^{2-}$ et SO_4^{2-} possèdent tous les deux un

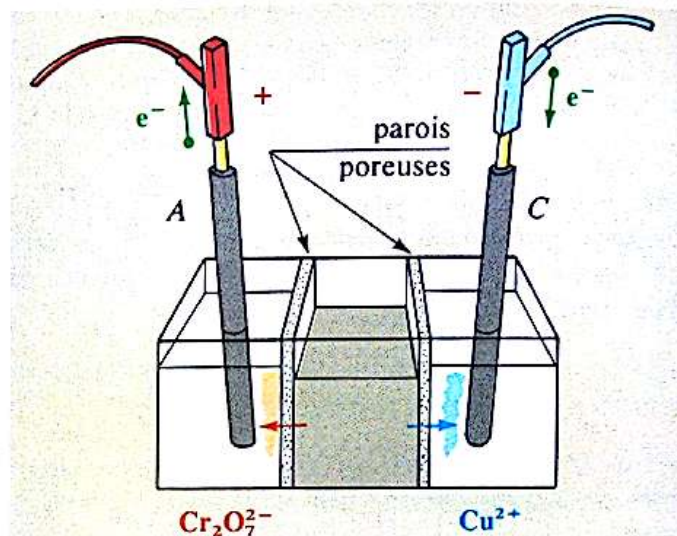


7. Dans le fond du tube en U, une solution contient des ions $Cr_2O_7^{2-}$ (orangés) et Cu^{2+} (bleus). De part et d'autre, anode et cathode plongent dans une solution conductrice incolore. Lorsque le courant passe, le compartiment anodique se colore en orangé tandis que le compartiment cathodique se colore en bleu.

excès de deux électrons; l'ion K^+ possède un défaut d'un électron.

Versons lentement, de part et d'autre, une solution conductrice incolore afin d'observer la migration des ions. Relions les électrodes de graphite à un générateur. Les « anions » orangés ($Cr_2O_7^{2-}$) se dirigent vers l'anode tandis que les « cations » bleus (Cu^{2+}) vont vers la cathode.

La figure 8 présente un autre montage mettant en évidence le même phénomène.



8. Le récipient est divisé en trois compartiments par deux parois poreuses. Entre les deux parois poreuses, la solution aqueuse contient des ions $Cr_2O_7^{2-}$ (orangés) et des ions Cu^{2+} (bleus). De part et d'autre, anode et cathode plongent dans des solutions conductrices incolores. Le courant passant dans le circuit, le compartiment anodique se colore en orangé (ions $Cr_2O_7^{2-}$) tandis que le compartiment cathodique se colore en bleu (ions Cu^{2+}).

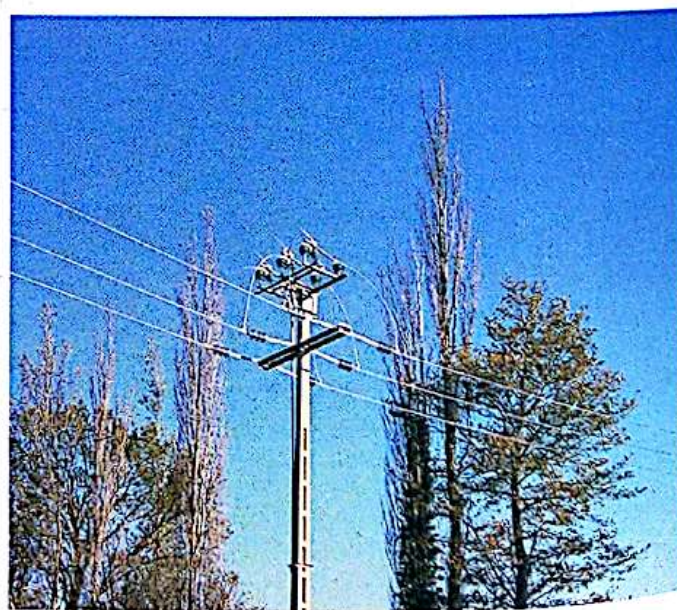
1.4 conducteurs et isolants

Nous avons vu dans les classes antérieures qu'il existait des substances plus ou moins bonnes conductrices de l'électricité.

Un corps qui conduit le courant est appelé conducteur; il contient des porteurs de charge non liés (électrons, ions...).

Un corps qui ne conduit pas le courant est appelé isolant; ses porteurs de charges sont liés, c'est-à-dire non susceptibles d'être mis en mouvement d'ensemble par un générateur.

Les matériaux utilisés pour la construction des appareils électriques et pour le transport de l'électricité doivent être bons conducteurs ou bons isolants. Ce sont évidemment les métaux et leurs alliages qui constituent les parties conductrices de l'électricité : le cuivre, l'aluminium, le plomb, le zinc et le mercure sont les principaux métaux utilisés dans l'industrie électrique. Mais il est nécessaire aussi dans ces appareils de disposer de très bons isolants : mica, amiante, verre, bois et de nombreuses matières synthétiques dont les propriétés sont chaque jour améliorées.



Pylône pour ligne électrique. Les câbles sont en aluminium, les supports isolants en verre ou en céramique.

(*) En fait il s'agit d'ions hydratés $[Cu(H_2O)_6]^{2+}$.

Fiche expérimentale

électrolyse d'une solution de chlorure de cuivre II

Expérience

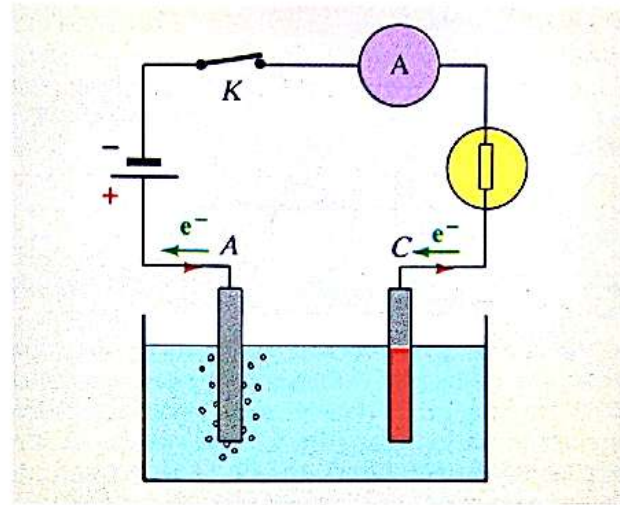
Réalisons le circuit de la figure 9. Deux électrodes A et C, en graphite, plongent dans une solution aqueuse de chlorure de cuivre II.

Fermons l'interrupteur : l'ampèremètre dévie, la lampe brille. Il y a passage d'un courant électrique. Dans la solution le courant arrive par l'anode (électrode A) et sort par la cathode (électrode C). Cette solution conductrice est un électrolyte.

- Sur l'électrode A se dégage immédiatement un gaz, assez soluble dans l'eau, caractérisé par son odeur suffocante. Il décolore l'indigo : c'est du dichlore.

- Sur l'électrode C se forme une mince pellicule rougeâtre : c'est un dépôt de cuivre.

Nous venons d'électrolyser une solution de chlorure de cuivre II.



9. Du générateur, le courant arrive à l'Anode.

Interprétation

1. Conduction

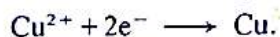
Lorsqu'on dissout les cristaux de chlorure de cuivre II dans l'eau, les cristaux se fragmentent en ions cuivre Cu^{2+} (chaque ion possède un défaut de deux électrons) et en ions chlorure Cl^- (chaque ion possède un excès d'un électron). Ces ions sont libres de se déplacer parmi les molécules d'eau. Sous l'action du générateur, ils se mettent en mouvement ordonné et acquièrent une vitesse d'ensemble.

- Les ions Cu^{2+} se dirigent vers la cathode C : ce sont des cations (chargés positivement, ils manifestent un défaut d'électrons). Dans l'électrolyte, les ions positifs migrent dans le sens conventionnel du courant.

- Les ions Cl^- se dirigent vers l'anode A : ce sont des anions (chargés négativement, ils manifestent un excès d'électrons). Dans l'électrolyte, les ions négatifs migrent dans le sens opposé au sens du courant.

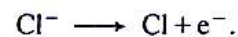
2. Au niveau des électrodes

Dans le circuit métallique extérieur, les électrons arrivent à la cathode. La cathode cède des électrons aux ions Cu^{2+} qui sont en contact avec elle. Ce phénomène se traduit globalement par :

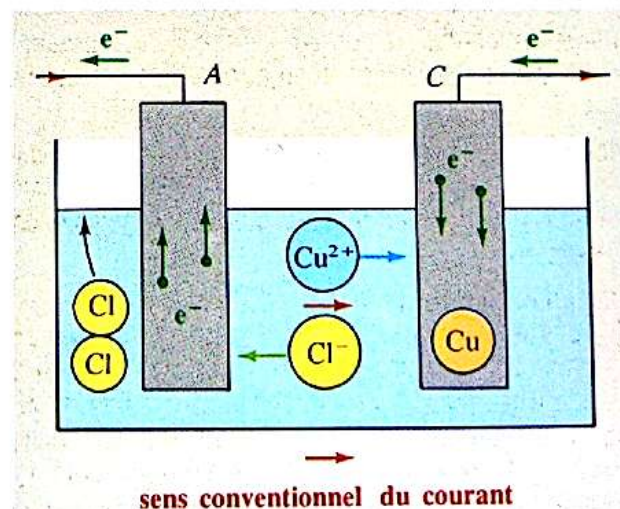
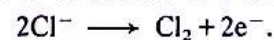


Les ions Cu^{2+} se transforment en atomes de cuivre : l'ensemble de ces atomes constitue le dépôt de métal cuivre observé sur la cathode.

Dans le même temps, l'anode accapare des électrons qui partent dans le circuit extérieur métallique vers la borne + du générateur. Au contact de l'anode, les ions Cl^- cèdent leur électron excédentaire :



Les atomes de chlore formés s'associent ensuite par deux pour former des molécules diatomiques Cl_2 ; l'ensemble de ces molécules constitue le gaz dichlore observé au niveau de l'anode.



10. La Cathode Cède des électrons à l'ion cuivre II. L'Anode Accapare des électrons laissés par les ions. Dans la solution, il n'y a pas d'électrons qui circulent.

DOCUMENT

Aperçu historique sur l'électricité

L'existence de l'électricité nous paraît une évidence. Imaginez notre monde moderne sans la *fée électricité* : plus de moyens de communication, de calculatrices électroniques, de machines... Tout progrès serait devenu pratiquement impossible. Pour expliquer la structure atomique et moléculaire, nous devons faire encore appel à l'électricité. Les échanges au niveau des cellules se formulent par des échanges ioniques à travers des membranes; notre cerveau ne pourrait pas fonctionner sans elle. C'est pourtant relativement tard que l'homme a réussi à comprendre son rôle.

On peut distinguer cinq périodes de découvertes, qui se chevauchent :

— La première est une période d'observation de l'électricité naturelle (foudre, électricité de l'atmosphère, aurores polaires...). Six cents ans avant J.-C., on avait constaté l'attraction qu'exerce l'ambre sur les corps légers (d'où l'origine grecque du mot *électron* qui signifie ambre).

— La deuxième commence au XVIII^e siècle où l'on apprend à créer de l'électricité statique. Dufay (1733) découvre les charges positives et négatives, observe les interactions entre ces charges. Mais c'est Coulomb qui énonce les premières lois physiques.

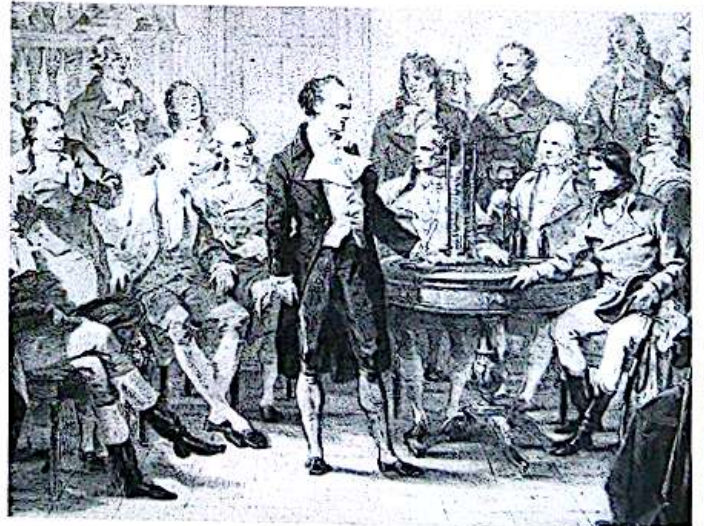
— La troisième débute par la découverte de la pile qui conduit à l'étude de l'électricité dynamique. Volta, en novembre 1800, reçoit la médaille d'or de l'Institut à Paris pour ses expériences sur la pile. On découvre les premiers effets (calorifiques, magnétiques, chimiques) et les premières applications. Ørsted (1820) effectue de nombreuses expériences d'électromagnétisme. Ces expériences complétées par Ampère et Laplace se traduisent par l'énoncé des lois de l'électromagnétisme.

— Par la découverte de l'induction, Faraday (1831) ouvre l'ère de la quatrième période. Toutes les applications industrielles du début du XX^e siècle en découlent (moteurs, alternateurs...).

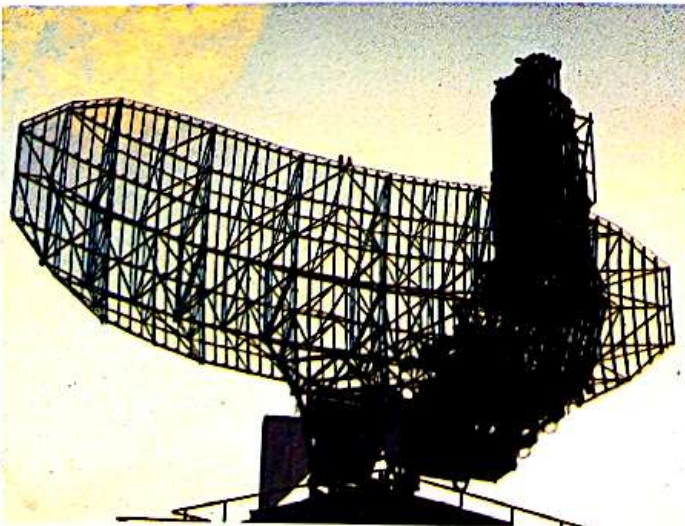
— Maxwell, vers 1865, édifie la théorie des ondes électromagnétiques. C'est le prélude théorique à la période des télécommunications qui caractérise le XX^e siècle. C'est aussi un premier pas vers une synthèse des conceptions théoriques sur l'électricité et la lumière : les ondes lumineuses ne constituent qu'une partie des ondes électromagnétiques.



Charles Augustin de Coulomb (1736-1806). Il établit, notamment, la loi physique relative aux interactions entre charges électriques.



Volta présentant sa pile à Bonaparte.



◀ Les radars constituent une importante application des ondes électromagnétiques.

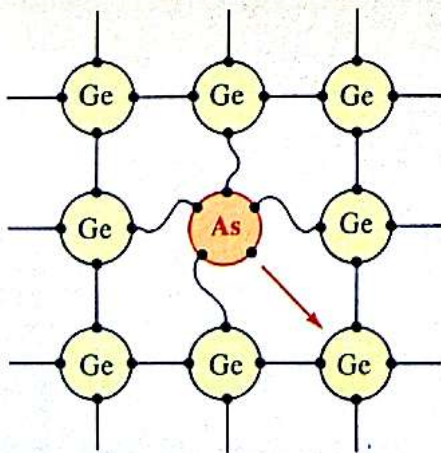
Les semi-conducteurs

Il existe une catégorie de solides, intermédiaires entre les isolants et les conducteurs métalliques : les **semi-conducteurs** (germanium, silicium, etc.). A basse température, ils se comportent comme des isolants; lorsque la température s'élève, ils deviennent conducteurs. Le mode de conduction de ces substances est complexe, mais il peut être expliqué comme suit.

Prenons l'une d'entre elles, le **germanium**, élément que nous trouvons dans la quatorzième colonne du tableau périodique (voir chapitre 26); le cristal pur de germanium est un cristal atomique, de même structure que celle du diamant, et les quatre électrons de la couche périphérique sont tous engagés dans des liaisons covalentes avec les électrons des atomes voisins du réseau cristallin. Normalement, le cristal est isolant, comme le diamant. Cependant, par élévation de température, certains électrons, bien que fortement liés, s'échappent dans le réseau cristallin où ils sont *libres*. Ils peuvent alors participer à la conduction du courant électrique.

Mais ces électrons laissent derrière eux une place vacante à laquelle on peut associer une charge positive e que l'on désigne sous le nom de lacune ou **trou positif**. Ce dernier peut être facilement occupé de nouveau par un électron provenant d'un atome voisin, lequel laissera un nouveau trou à l'endroit qu'il a quitté. A une température donnée, il s'établit un équilibre statistique, ce qui signifie que, dans le cristal, il y a un nombre constant d'électrons libres et de trous positifs qui changent constamment de position de façon désordonnée. A la température ordinaire, 25 °C, pour 10^{10} atomes, il n'y a que deux paires électron-trou! Cependant, la conductibilité qui en résulte n'est pas négligeable bien que 10^7 fois plus faible que celle du cuivre. C'est la **conductibilité intrinsèque** du monocristal pur.

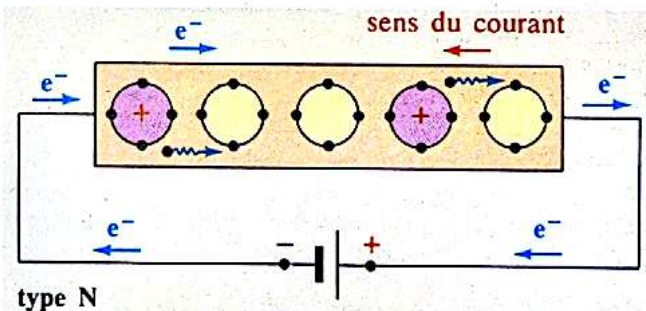
Les recherches entreprises dans les années 1944-1947 à la Bell Telephone Company par des physiciens américains conduisirent, en vue d'augmenter la conductibilité des semi-conducteurs, à ajouter en quantité infime des atomes étrangers au cristal pur : c'est le **dopage** du semi-conducteur. Le dopage reste très faible : un atome d'impureté pour 10^9 à 10^4 atomes de germanium.



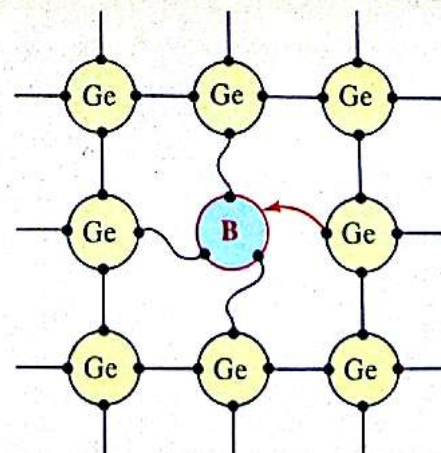
11a. Un atome d'impureté, ici l'arsenic, vient rompre le bel édifice du réseau cristallin de germanium. Le cinquième électron de cet atome est libre. Le semi-conducteur est du type N.

Comme impureté, on peut prendre de l'arsenic qui, suivant le germanium dans la classification périodique, a sensiblement le même encombrement, ce qui lui permet de se substituer facilement à un atome de germanium sans destruction du cristal (fig. 11 a). Mais l'atome d'arsenic possède cinq électrons sur sa couche externe; quatre d'entre eux assureront les quatre liaisons de covalence avec les atomes de germanium voisins. Le cinquième électron sera *libre*, abandonnant l'atome d'arsenic qui devient alors un ion positif As^+ . Ces électrons libres, donc mobiles, en nombre égal aux atomes d'impuretés, confèrent au cristal une **conductibilité extrinsèque**. Beaucoup plus importante que la conductibilité intrinsèque, elle croît avec le nombre d'atomes d'arsenic, mais varie peu avec la température. Le germanium ainsi dopé par l'arsenic est dit de **type N**, car sa conductibilité est assurée essentiellement par des électrons, porteurs de charge négative (fig. 12).

Introduisons maintenant d'autres impuretés à trois électrons périphériques telles que de l'indium ou du bore. Comme précédemment, les trois électrons vont participer aux liaisons de covalence, mais il manquera un électron pour participer à la quatrième liaison d'un atome de germanium. L'atome d'impureté prendra le quatrième électron nécessaire à un atome de germanium voisin; il deviendra un ion négatif (fig. 11 b).

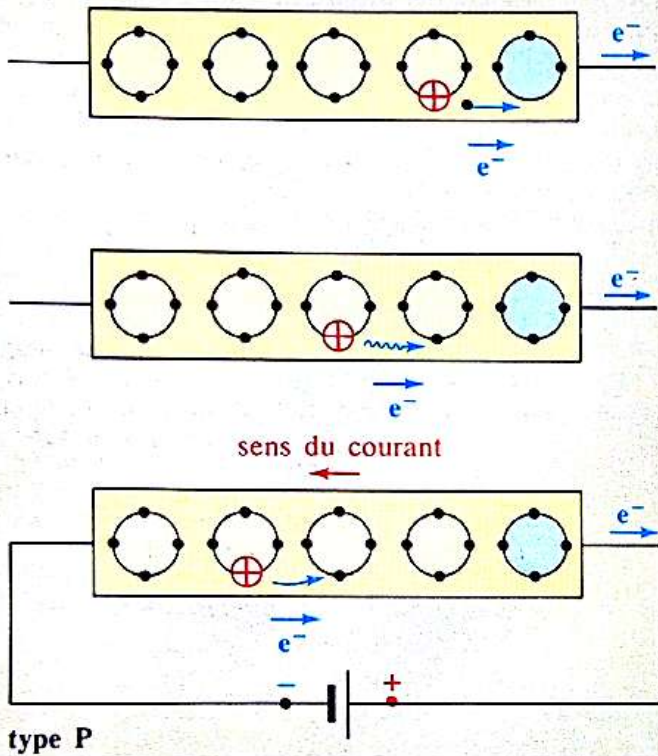


12. L'électron « excédentaire » quitte l'arsenic; la conduction se fait essentiellement par électrons excédentaires.



11b. Si l'atome d'impureté est maintenant du bore, il attire un électron d'un atome voisin, laissant à sa place un trou. Le semi-conducteur est du type P.

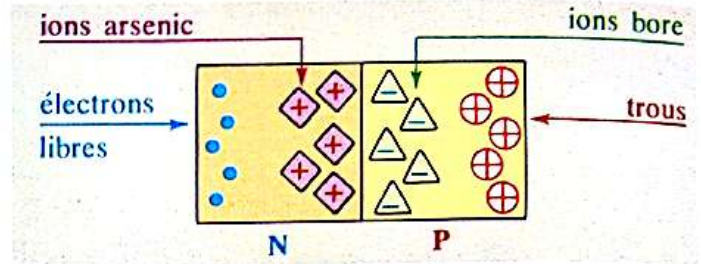
L'électron déplacé laissera derrière lui un *trou positif* qui sera susceptible de se déplacer librement dans le réseau par recombinaison avec des électrons (fig. 13). A la température ordinaire, le nombre de trous sera sensiblement égal à celui des atomes d'impuretés. Le germanium est dit de **type P** parce que tout se passe comme si sa conductivité était essentiellement assurée par des porteurs de charge positive (les trous). En fait, il ne faut pas oublier que ce n'est qu'une migration d'électrons par recombinaison de paires électron-trou. Cette conductivité extrinsèque est sensiblement constante avec la température.



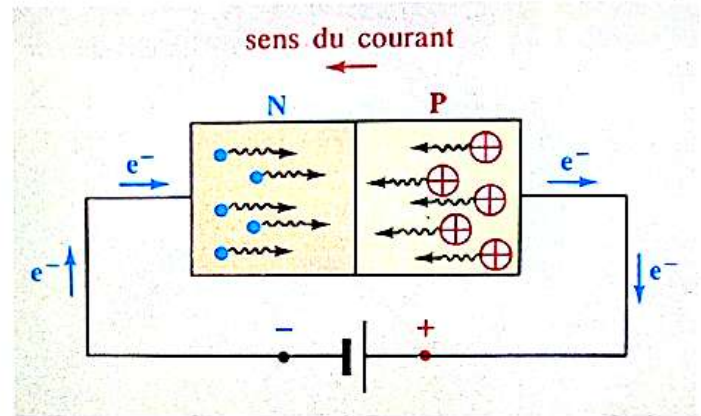
13. Un électron issu du germanium comble le « déficit » d'électrons du bore. Le « trou » ⊕ ainsi créé se déplace dans le sens du courant. La conduction se fait essentiellement par trous.

Associés maintenant deux matériaux de type N et de type P (fig. 14). On obtient une jonction P-N, base de nombreux composants en électronique. La zone limite est d'épaisseur très faible, de l'ordre de 10^{-3} mm. En l'absence de générateur branché aux extrémités de la jonction, un phénomène de diffusion des porteurs fait apparaître des zones chargées positivement et négativement. Ces zones créent une véritable barrière qui empêche les électrons de la zone N de rejoindre les trous de la zone P.

Branchons un générateur comme l'indique la figure 15. Les électrons de la zone N sont repoussés vers la jonction par la borne négative de la pile tandis que les trous sont chassés eux aussi vers la jonction par la borne positive. Des électrons de la zone N traversent alors la jonction et se mettent à combler des trous. Ces électrons, attirés par la borne positive de la pile, créent à nouveau des trous dans la zone P lorsqu'ils quittent cette zone.



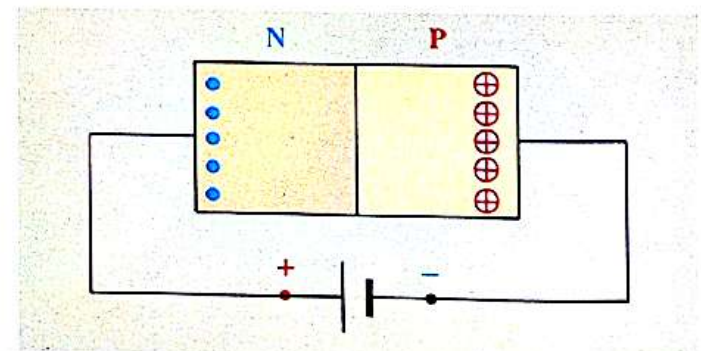
14. Jonction PN.



15. Passage du courant dans le sens P → N.

Un courant formé d'électrons et de trous allant à la rencontre les uns des autres s'établira dans la jonction. On dit que la jonction est *passante*.

Inversons les bornes du générateur (fig. 16). Les électrons de la zone N sont attirés vers la borne positive, alors que les trous le sont vers la borne négative. Les porteurs ne peuvent plus traverser la jonction; le courant est pratiquement nul.



16. La jonction est bloquée.

En fait, il existe un faible courant dit *inverse*, lié à la conductivité intrinsèque. Si le générateur est trop fort, il peut alors se produire le claquage de la jonction. On communique aux électrons une grande vitesse qui permet d'arracher d'autres électrons et de créer ainsi des paires électron-trou. Le courant peut devenir important, la température augmente et la jonction est alors détruite.

Le courant ne peut donc normalement passer que dans le sens P → N dans une jonction P-N. Cet « effet diode » a de nombreuses applications en électronique (voir chapitre 10).

Faire le point

- Quelle est la charge portée par un électron?
- Un cation possède-t-il un défaut ou un excès d'électrons?
- Un anion possède-t-il un défaut ou un excès d'électrons?
- Quelle est la nature du courant électrique dans un conducteur métallique?
- Quelle est la nature du courant électrique dans un électrolyte?
- Définir le sens conventionnel du courant électrique par rapport au déplacement des électrons.
- Donner le sens de déplacement des cations et des anions dans un électrolyte par rapport au sens conventionnel du courant.
- Un isolant possède-t-il des porteurs de charge non liés?

Apprenons à calculer rapidement de tête et avec une calculatrice

1/ On considère une suite d'opérations :

$$A = \frac{1,6 \cdot 10^{-8} \times 3,2 \cdot 10^4}{0,8 \cdot 10^7} \quad B = \frac{(2,5 \cdot 10^{-4})^3}{(-0,75 \cdot 10^8)^2}$$

$$C = \frac{(3 \cdot 10^8)^2 \times 9,1 \cdot 10^{-31}}{(-6,6 \cdot 10^{-8}) \times (1,5 \cdot 10^3)^3}$$

$$D = \frac{\sqrt{1,4 \cdot 10^{-4}} \times 6,6 \cdot 10^{-5}}{(-12,4 \cdot 10^{-8}) \times (2 \cdot 10^{-4})^4}$$

a/ Sans calculatrice, mettre approximativement les nombres A, B, C, D sous la forme $a \cdot 10^m$, a et m étant des nombres entiers relatifs.

b/ Avec une calculatrice, calculer les nombres et donner le résultat avec quatre chiffres significatifs.

2/ On donne : $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$; $c = 2,999 \cdot 10^8$;
 $G = 6,672 \cdot 10^{-11}$; $k = 1,381 \cdot 10^{-23}$; $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$;
 $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$; $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$; $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$.

Calculer les grandeurs suivantes :

$$L_p = \sqrt{\frac{h \cdot G}{2\pi \cdot c^3}}; \quad G = \frac{8\pi^5 \cdot k^4}{60 \cdot c^2 h^3}; \quad L = \frac{\pi^2}{3} \cdot \left(\frac{k}{e}\right)^2;$$

$$E = \frac{m_e \cdot c^2}{10^6 \cdot e}; \quad H = \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot c^2; \quad \mu = \frac{e \cdot h}{4\pi \cdot m_e}$$

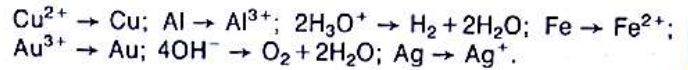
On pourra d'abord trouver l'ordre de grandeur sans calculatrice, puis on calculera la valeur exacte à la machine en donnant quatre chiffres significatifs.

Électrolyse

1.1 Après avoir relu la fiche expérimentale (page 7), identifier dans la liste d'ions suivante, les cations et les anions. Donner pour chaque ion le nombre d'électrons en excès ou en défaut :

potassium : K^+ ; nitrate : NO_3^- ; sulfate : SO_4^{2-} ; argent : Ag^+ ; fer III : Fe^{3+} ; zinc : Zn^{2+} ; ammonium : NH_4^+ ; hydroxyde : OH^- ; hydronium : H_3O^+ ; hydrogénocarbonate : HCO_3^- ; aluminium : Al^{3+} ; carbonate : CO_3^{2-} ; sulfure : S^{2-} ; chrome : Cr^{3+} ; étain : Sn^{2+}

1.2 Dans les réactions électroniques suivantes, placer correctement le nombre d'électrons mis en jeu; exemple : $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$



1.3 L'électrolyse du chlorure d'étain (Sn^{2+} et Cl^-) donne un dépôt de métal étain (Sn) et un dégagement de dichlore Cl_2 sur les électrodes.

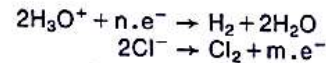
1/ Indiquer sur un schéma le sens de déplacement des ions par rapport au sens conventionnel du courant.

2/ Écrire les réactions électrochimiques au niveau des électrodes.

1.4 L'électrolyse d'une solution d'acide chlorhydrique (ions H_3O^+ et Cl^-) donne un dégagement de dichlore Cl_2 et de dihydrogène H_2 sur les électrodes.

1/ Faire un schéma de l'électrolyseur et préciser sur quelles électrodes se forment les gaz.

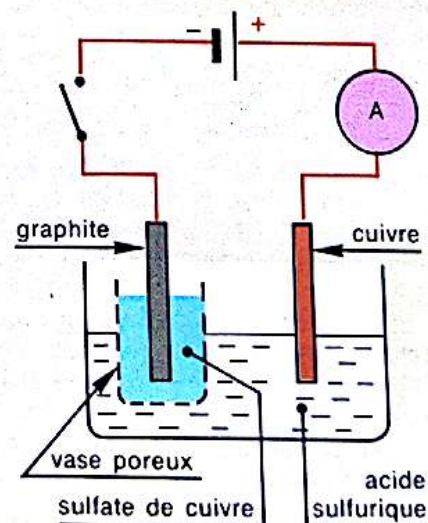
2/ Au niveau des électrodes, les réactions électrochimiques s'écrivent :



Déterminer les nombres n et m.

1.5 Une expérience à faire à la maison. Demandez à votre professeur quelques grains de sulfate de cuivre que vous dissoudrez dans un verre d'eau. Plongez-y deux bâtonnets de graphite récupérés sur une pile usagée et reliez ces deux électrodes aux bornes d'une pile de 4,5 V. Observez les phénomènes. Faites un schéma en indiquant l'électrode où se forme le dépôt de cuivre. Inversez le sens du courant, observez les phénomènes.

1.6 On a schématisé sur la figure ci-dessous une expérience d'électrolyse.



1.6

Lorsque l'interrupteur est fermé, l'aiguille de l'ampèremètre dévie. Les pores du vase poreux permettent le passage des ions porteurs de charge sans que les solutions se mélangent. Au bout de quelques minutes, on observe un dépôt de métal cuivre (atomes Cu) sur la cathode de graphite. Dans le même temps, autour de l'anode, apparaît une coloration bleue. En attendant plus

longtemps, la solution bleue de sulfate de cuivre entourant la cathode se décolore, tandis que l'anode est « rongée ». Écrire le bilan des réactions qui se produisent à l'anode et à la cathode.

1.7 Disposant d'une solution de chlorure de zinc contenant les ions Zn^{2+} et Cl^- , on veut recouvrir de métal zinc un objet de surface 10 cm^2 .

1/ Comment peut-on procéder?

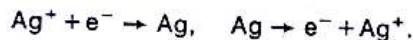
2/ Sachant que le courant qui produit l'électrolyse dépose $1,1\text{ g}$ de métal zinc par heure, calculer le temps nécessaire pour obtenir un dépôt de $0,1\text{ mm}$ d'épaisseur. Calculer le débit d'électrons, c'est-à-dire le nombre d'électrons qui passent par seconde dans les fils conducteurs.

Données : la masse volumique du métal zinc est de $7,14\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$; la masse d'un atome de zinc est de $1,086\cdot 10^{-22}\text{ g}$, soit $65,4\text{ g}$ pour $6,022\cdot 10^{23}$ atomes.

1.8 Les couverts de table sont argentés par électrolyse d'une solution contenant des ions d'argent (Ag^+); la cathode est constituée par les éléments métalliques à argenter; l'anode est constituée par un bloc d'argent.

1/ Faire un schéma de l'électrolyse.

2/ Les deux réactions électroniques qui se passent aux électrodes sont les suivantes :



Quelles sont les réactions qui se produisent à l'anode et à la cathode?

3/ Sur une surface totale de 1 dm^2 , il se dépose 3 g d'argent en 20 minutes. Sachant que dans 108 g d'argent il y a $6,02\cdot 10^{23}$ atomes, quel est le nombre d'électrons qui arrivent à la cathode en 1 seconde? Ce nombre est appelé débit d'électrons.

1.9 Afin d'éviter la corrosion de certaines pièces en acier, on les « galvanise ». Chercher la signification de ce mot et expliquer le procédé de galvanisation. Même question pour le « chromage » des pièces.

1.10 Dans l'industrie alimentaire, on utilise des boîtes de conserve en fer étamé. Chercher la signification de ce mot et expliquer le procédé d'« étamage ».

1.11 On réalise l'électrolyse d'une solution aqueuse de chlorure de cuivre II. Sur l'électrode B reliée à un pôle d'un accumulateur, on observe un dépôt de cuivre. Sur l'électrode A reliée à l'autre pôle, se dégage du dichlore.

1/ Indiquer, sur un schéma, le sens de déplacement des ions dans la solution, le sens de déplacement des électrons dans les fils extérieurs, le sens du courant électrique, le signe des pôles du générateur.

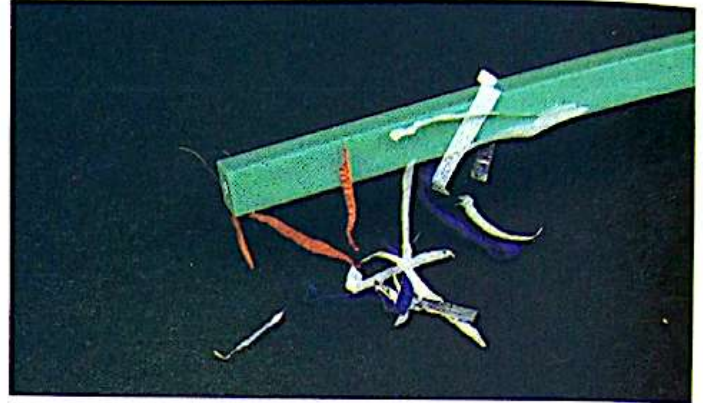
2/ Sachant qu'en 5 minutes, il se dépose $6,35\text{ g}$ de cuivre, calculer le nombre d'électrons qui arrivent ou qui sortent du générateur par seconde.

Donnée : dans $63,5\text{ g}$ de cuivre, il y a $6,02\cdot 10^{23}$ atomes de cuivre.

Corps chargés

Lorsque vous quittez certains vêtements, il se produit des crépitements et même des étincelles observables dans l'obscurité; lorsqu'on frotte une règle de plexiglas sur un

vêtement, cette règle attire des bouts de papier : on dit que ces corps se sont électrisés. Lors de telles expériences d'électrisation, il n'y a jamais création de charges mais simplement transfert d'électrons d'un corps sur un autre : la charge totale d'un système électriquement isolé se conserve. Lorsqu'un corps possède un défaut de n électrons, sa charge est égale à $q = +n\cdot e = n\cdot 1,6\cdot 10^{-19}\text{ C}$; lorsqu'il possède un excès de n électrons, sa charge est $q' = -n'\cdot e = -n'\cdot 1,6\cdot 10^{-19}\text{ C}$.



1.12 Un corps porte une charge de $+10^{-8}\text{ C}$. Possède-t-il un défaut ou un excès d'électrons? Calculer le nombre d'électrons correspondant.

1.13 Une boule de bureau porte une charge de -10^{-9} C . Possède-t-elle un défaut ou un excès d'électrons? Calculer le nombre d'électrons correspondant.

1.14 Un corps possède une charge de $+2\cdot 10^{-8}\text{ C}$. Quel est le nombre d'électrons qu'il faut lui apporter pour neutraliser sa charge?

1.15 Deux corps identiques possédant respectivement une charge $q = +2\cdot 10^{-8}\text{ C}$ et $q' = -10^{-7}\text{ C}$ sont mis en contact. Quelle est alors la charge portée par chaque corps?

1.16 Deux boules identiques portent respectivement les charges $q = 2,8\cdot 10^{-8}\text{ C}$ et $q' = -2\cdot 10^{-8}\text{ C}$. Elles sont mises en contact. Quelle est la quantité d'électricité (ou la charge) portée par chacune des deux boules?

1.17 Un faisceau d'électrons rencontre une sphère. En admettant que tous les électrons du faisceau restent sur la sphère et qu'il arrive $6\cdot 10^{12}$ électrons par seconde, quelle est la variation de la charge de cette sphère au bout de 10 secondes?

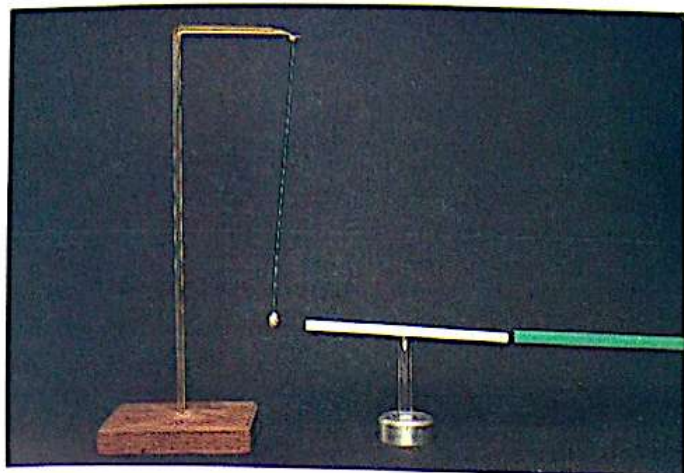
1.18 Un faisceau de particules α tombe sur un corps possédant une charge électrique $q = -3,2\cdot 10^{-12}\text{ C}$. Sachant que cette charge est neutralisée au bout de 10^{-1} seconde et que le faisceau transporte 10^8 particules par seconde, on demande :

1/ le signe de la charge d'une particule α ;

2/ la valeur de la charge d'une particule α .

1.19 La photographie ci-après représente l'expérience suivante : la règle en polyéthylène frottée avec du drap est chargée positivement (défaut d'électrons). On l'approche de la règle d'aluminium posée sur le support isolant; le pendule électrostatique initialement déchargé, en contact avec la règle, s'écarte de l'extrémité de la règle. Des électrons non liés se sont déplacés sur

la règle. Interpréter le phénomène, sachant que des corps chargés de même signe se repoussent, et que des corps chargés de signe contraire s'attirent. Le pendule électrostatique est en papier d'aluminium.

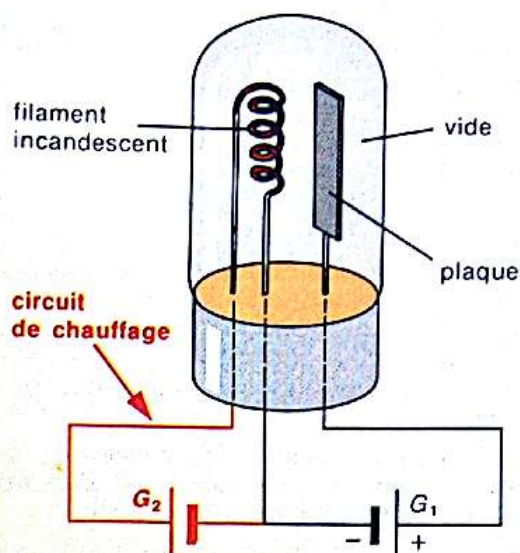


1.20 On réalise l'expérience suivante : sur un béccher bien sec, on place un barreau de métal. L'une des extrémités est en contact avec une boule de sureau. On touche l'autre extrémité avec un barreau de verre frotté avec de la laine. Que se passe-t-il? Interpréter. L'expérience peut-elle être réalisée avec le bâton posé sur n'importe quel support?

1.21 Le corps humain est un très médiocre conducteur. Cependant pourquoi ne pouvez-vous pas électriser une tige métallique en la tenant simplement dans la main? Que devez-vous faire pour l'électriser par frottement, avec du coton par exemple?

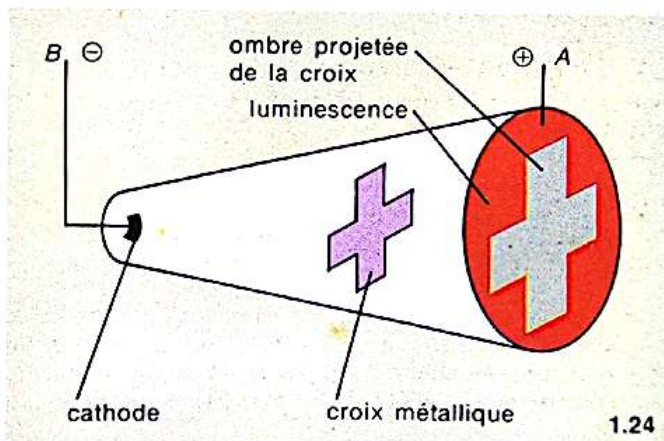
1.22 Deux barreaux de métal, *A* et *B*, posés sur des bécchers secs, ont une extrémité en contact. On approche de l'extrémité libre de *B*, sans la toucher, un bâton chargé positivement. En s'interrogeant sur le déplacement des charges, pouvez-vous expliquer pourquoi, lorsqu'on sépare *A* et *B*, l'un est chargé positivement, l'autre négativement?

1.23 La lampe diode schématisée ci-après utilise l'effet thermoélectronique : un métal chauffé (le filament incandescent) peut émettre des électrons. La plaque reliée à la borne + du générateur G_1 peut recueillir les électrons. Dans quel sens le courant électrique peut-il circuler dans le circuit noir? Si on inverse les pôles du générateur G_1 , le courant peut-il alors circuler? G_2 est un générateur moins puissant que G_1 .



1.23

1.24 Aux extrémités *A* et *B* d'un tube contenant un gaz suffisamment raréfié, on applique une haute tension. La face *A* est recouverte d'une substance fluorescente. Lorsqu'on abaisse la croix métallique, l'ombre portée disparaît; toute la surface est illuminée. On peut donc admettre que la croix opaque arrête un rayonnement émis par la cathode, qui ne devient visible que lorsqu'il touche la face *A* : on dit que ce sont des rayons cathodiques. Comment interpréter cette expérience historique si l'on considère que ce rayonnement est en fait constitué de particules chargées émises par la cathode?



1.24

Intensité du courant

2.1 définition de l'intensité d'un courant continu

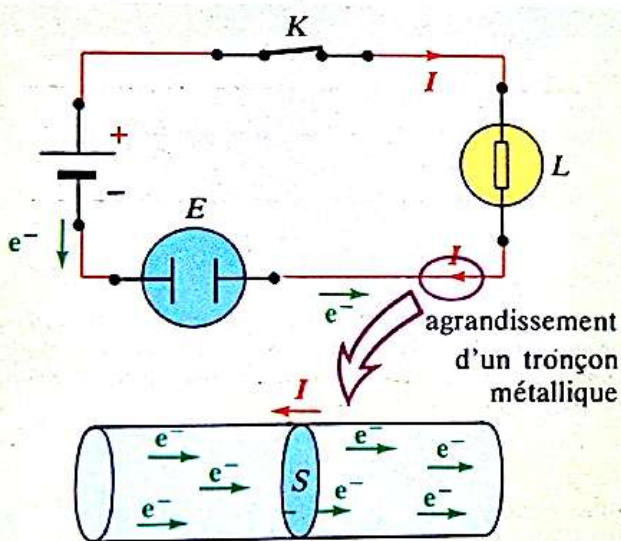
2.1.1 expérience

Le circuit série de la figure 1 comporte, outre le générateur, une lampe L et un électrolyseur E contenant de l'eau pure. La lampe ne brille pas.

La lampe et l'électrolyseur possèdent deux bornes; ils sont appelés dipôles.

Tout en agitant, ajoutons progressivement des cristaux de chlorure de sodium dans l'eau. La lampe brille de plus en plus. Le courant devient plus intense.

En se dissolvant, le chlorure de sodium libère des porteurs de charge : les ions chlorure Cl^- et sodium Na^+ assurent le passage du courant. Plus leur nombre est grand, plus le courant est intense.



1. E est une cuve à électrolyse et L une lampe.

2.1.2 définition de l'intensité

Un courant est dû à un déplacement de porteurs de charges : l'observation précédente suggère que l'intensité d'un courant est une grandeur liée au débit de ces porteurs de charges, c'est-à-dire au nombre de porteurs de charge qui, chaque seconde, traversent une section de conducteur.

Si ce débit est invariable dans le temps, le courant est dit continu.

Désignons par Q la valeur absolue de la quantité d'électricité, c'est-à-dire la charge portée par l'ensemble des porteurs traversant une section S du conducteur pendant la durée t .

- L'intensité I d'un courant continu est le rapport de la valeur absolue Q de la quantité d'électricité qui traverse une section du conducteur par la durée t de passage :

$$I = \frac{Q}{t}$$

Si Q est mesurée en coulombs (symbole : C) et t en secondes (symbole : s), l'intensité I se mesure en ampères (symbole : A).

- L'ampère (symbole : A) est l'unité d'intensité d'un courant.

Application 1 :

Le cyclotron est un accélérateur de particules chargées. Le C.E.R.N. à Genève dispose d'un cyclotron où des particules chargées, appelées protons, décrivent plusieurs fois un cercle de 200 m de diamètre, à très grande vitesse. Un proton est le noyau d'un atome d'hydrogène; il porte une charge positive égale à $+e$. Le faisceau de protons est équivalent à un courant d'intensité 100 microampères (μA).

Quel est le nombre de protons qui traversent une section du cyclotron pendant une seconde?

La valeur absolue de la quantité d'électricité Q portée par un ensemble de porteurs de charge identiques est égale au produit de la valeur absolue $|q|$ de la charge individuelle par le nombre n de porteurs :

$$Q = n \cdot |q|.$$

L'intensité du courant correspondant est :

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{n \cdot |q|}{t}.$$

Le quotient, $D = n/t$, représente le débit, c'est-à-dire le nombre de porteurs qui traversent une section chaque seconde :

$$I = |q| \cdot D.$$

Numériquement :

$$D = \frac{I}{|q|} = \frac{100 \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 6,25 \cdot 10^{14} \text{ protons/seconde.}$$

2.1.3 ordre de grandeur de quelques intensités

Citons à titre d'exemples les mesures d'intensités de quelques courants alimentant respectivement :

- une lampe à incandescence : 0,1 à 5 A selon la lampe,
- un fer à repasser : de 3 à 6 A,
- un radiateur : de 5 à 15 A,
- un moteur de machine-outil : 10 A,
- une locomotive : environ 500 A.

A la foudre correspondent des courants dont les intensités sont évaluées entre 6000 et 50000 A.

Dans les circuits électroniques (poste radio, calculatrices, ordinateurs...) l'intensité des courants est faible : on l'exprime en sous-multiple de l'ampère :

- le milliampère (mA) : $1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$,
- le microampère (μA) : $1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$,
- le nanoampère (nA) : $1 \text{ nA} = 10^{-9} \text{ A}$.

Remarque : pour les besoins industriels on utilise une unité de quantité d'électricité plus grande que le coulomb : l'ampère.heure (symbole : A.h).

L'ampère.heure est la quantité d'électricité débitée par un courant d'intensité 1 A durant 1 h.

Que vaut 1 Ah en coulombs? On a $Q = I.t$.

Avec $I = 1 \text{ A}$ et $t = 1 \text{ h}$: $Q = 1 \times 1 = 1 \text{ A.h}$.

Avec $I = 1 \text{ A}$ et $t = 3600 \text{ s}$: $Q = 1 \times 3600 = 3600 \text{ C}$.

$$1 \text{ A.h} = 3600 \text{ C}$$

Une batterie d'accumulateurs porte l'indication : 50 A.h ; cela signifie que cette batterie peut débiter :

$$Q = 50 \times 3600 = 180\,000 \text{ C}$$



Application 2 :

Un fil métallique cylindrique contient N électrons non liés par mètre cube. Dans ce fil de section droite d'aire S , ces électrons circulent à la vitesse d'ensemble v et provoquent un courant d'intensité I .

1/ Pour $I = 2 \text{ A}$, calculer le débit d'électrons à travers la section S du fil.

2/ Donner la relation qui existe entre I , N , S , v et e .

Calculer v .

Application numérique : $I = 2 \text{ A}$; $S = 2 \text{ mm}^2$; $N = 8 \cdot 10^{28} \text{ e.m}^{-3}$; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

1/ Les électrons, particules chargées négativement, se déplacent en sens contraire du courant d'intensité I . Si n est le nombre d'électrons qui traversent une section du fil pendant la durée t :

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{n \cdot e}{t} = D \cdot e$$

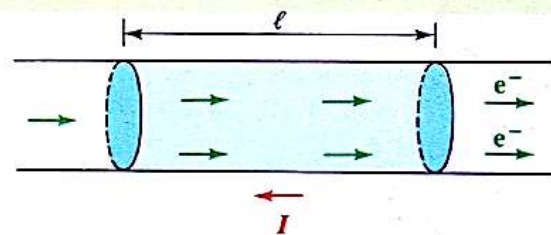
Le rapport $D = n/t$ est le débit d'électrons.

$$D = \frac{I}{e} = \frac{2}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,25 \cdot 10^{19} \text{ électrons/seconde}$$

2/ Considérons une portion de fil de longueur ℓ (fig. 2). Elle contient n électrons non liés :

$$n = N \cdot S \cdot \ell$$

Si v est leur vitesse d'ensemble, tous ces électrons passent à travers la section S pendant la durée t



2. La portion de fil de longueur ℓ contient N électrons qui progressent à la vitesse moyenne v ; tous ces électrons, y compris les plus éloignés, auront traversé la section d'aire S au bout d'un temps $t = \ell/v$.

telle que :

$$t = \frac{\ell}{v}$$

L'intensité du courant vaut :

$$I = D \cdot e = \frac{n}{t} \cdot e = \frac{N \cdot S \cdot \ell \cdot e}{\ell/v}$$

$$I = N \cdot S \cdot v \cdot e$$

L'intensité du courant dépend donc de la vitesse d'ensemble des porteurs de charge.

Numériquement :

$$v = \frac{I}{N \cdot S \cdot e} \approx 7,8 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$$

La vitesse correspondant au mouvement d'ensemble des électrons dans un conducteur métallique est très faible.

2.2 mesure de l'intensité

2.2.1 l'ampèremètre

Un ampèremètre mesure l'intensité du courant qui le traverse (voir fiche technique).

Dans le cas d'un appareil à aiguille, sa déviation d est proportionnelle à l'intensité I du courant :

$$I = k \cdot d$$

$\begin{array}{ccc} \text{A} & \text{A/div} & \text{div} \end{array}$

Le facteur de proportionnalité k représente l'intensité du courant provoquant une déviation d'une division. Il est donc égal au quotient du calibre utilisé (intensité pour laquelle l'aiguille est en fin de graduation) par le nombre total D de divisions que comporte la graduation :

$$k = \frac{\text{calibre}^{\text{A}}}{D^{\text{div}}}$$

$\begin{array}{ccc} \text{A/div} & & \text{div} \end{array}$

2.2.2 qualité d'une mesure

Un ampèremètre n'est pas un appareil parfait. Pour diverses raisons, la mesure qu'il donne est entachée d'une incertitude ΔI . Cette incertitude donne l'ordre de grandeur de l'imprécision de la mesure du fait de l'appareil (et qu'il ne faut pas confondre avec les éventuelles erreurs de lecture). Ainsi l'intensité ne peut être connue, au mieux, qu'à $\pm \Delta I$ près, l'incertitude ΔI étant toujours donnée en valeur absolue. Le constructeur prévient l'utilisateur en donnant, selon le type d'appareil, des indications pour évaluer cette incertitude.

• Pour les appareils à aiguille, on donne la classe de l'appareil, qui permet d'estimer l'incertitude due par manque de précision de cet appareil. Plus la classe est élevée, moins l'appareil est précis.

Prenons un exemple : Soit un appareil de classe 2,5, utilisé sur le calibre 3 A. Cela signifie que l'incertitude pour toute mesure utilisant ce calibre est égale à 2,5 % de ce dernier, soit :

$$\Delta I = \frac{2,5}{100} \cdot 3 = 0,075 \text{ A} \approx 0,08 \text{ A}.$$

Ainsi, sur ce calibre 3 A, le résultat d'une mesure quelconque est connu à 0,08 A près.

Si, par exemple, on a mesuré une intensité de 2,845 A, le chiffre 4 et *a fortiori* le chiffre 5 de 2,845 A ne sont pas significatifs. Cela montre qu'il faut donner le résultat d'une mesure avec un nombre limité de chiffres, du fait même de l'imprécision des mesures :

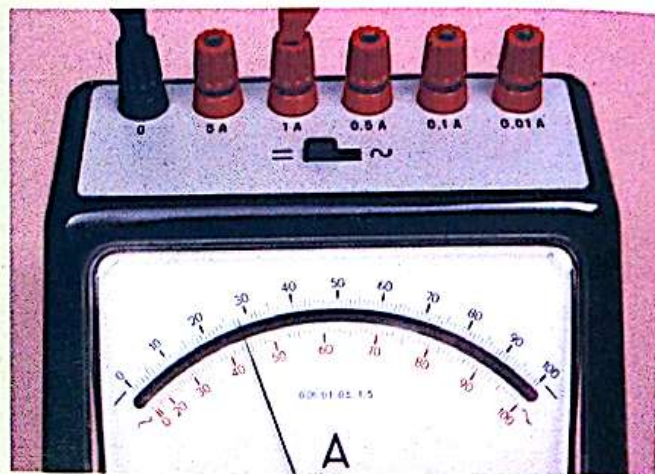
$$I = 2,84 \text{ A à } \pm 0,08 \text{ A près.}$$

Souvent on préfère donner le taux d'incertitude $\Delta I / I$, exprimé en pourcentage, qui permet de mieux caractériser la précision de la mesure. Dans notre exemple :

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{0,08}{2,84} = 0,028 \text{ soit } I = 2,84 \text{ A à } 2,8 \% \text{ près.}$$

Application 3 :

Quelle est la mesure de l'intensité du courant donnée par l'ampèremètre ci-dessous ?



Le calibre utilisé est 1 A et la graduation comporte $D = 100$ divisions :

$$k = \frac{1}{100} \text{ A/div.}$$

L'aiguille est fixée devant la division 28 :

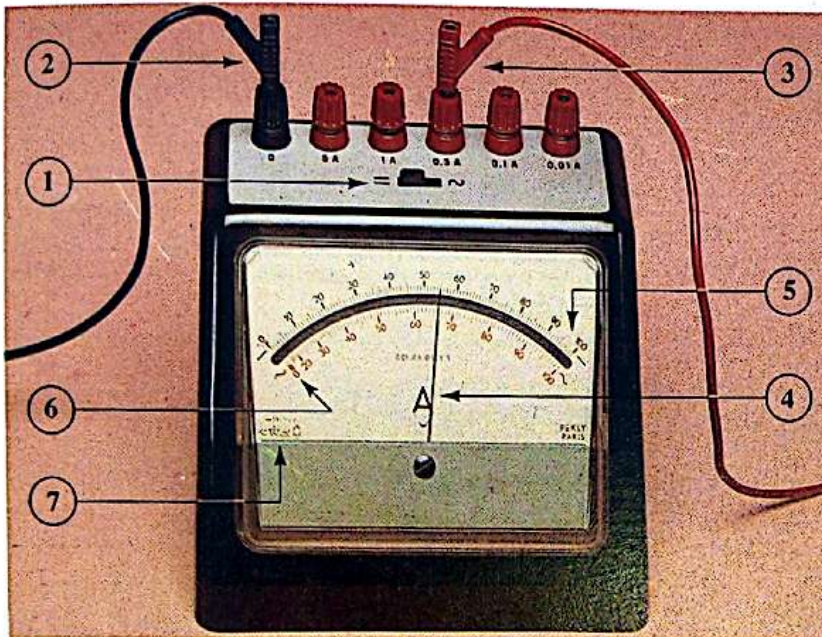
$$I = 28 \times \frac{1}{100} = 0,28 \text{ A.}$$

× k	100 div	28 div
	1 A	0,28 A

• Pour les appareils numériques, il faudra consulter la notice du constructeur. Selon l'appareil, selon le constructeur, les données qui permettent d'évaluer l'incertitude sur une mesure sont différentes.

Fiche technique

ampèremètre à aiguille



- ① commutateur continu (=) ou alternatif (~)
- ② borne de sortie du courant
- ③ borne d'entrée du courant correspondant à divers calibres
- ④ aiguille
- ⑤ graduation noire pour les mesures en courant continu
- ⑥ graduation rouge pour les mesures d'intensité efficace en courant alternatif sinusoïdal
- ⑦ classe de l'appareil

Pour effectuer la mesure d'une intensité d'un courant continu dans un circuit électrique, réaliser les opérations suivantes :

- **Choisir le mode continu.** Un ampèremètre permet de mesurer en général soit l'intensité d'un courant continu, soit l'intensité efficace d'un courant alternatif sinusoïdal; le commutateur ① permet de choisir le mode continu (position = ou DC, de l'anglais « Direct Current », selon les appareils).

- **Brancher l'appareil en série.** Réaliser une coupure dans le circuit et insérer l'ampèremètre entre les deux extrémités de la coupure de telle façon que (fig. 3) :

- le courant sorte de l'appareil par la borne noire ②,
- le courant entre dans l'appareil par une des bornes rouges ③.

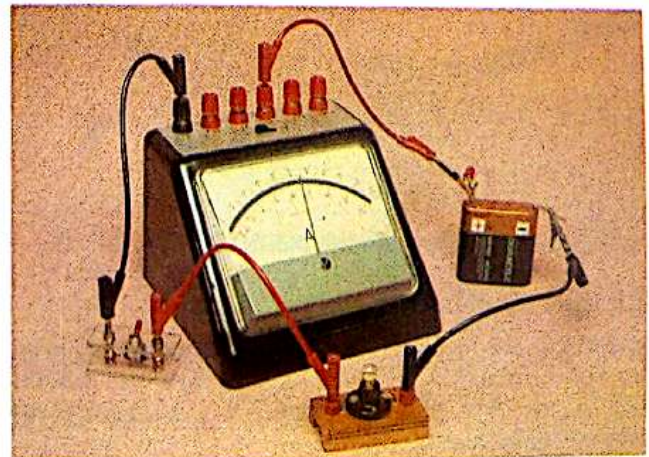
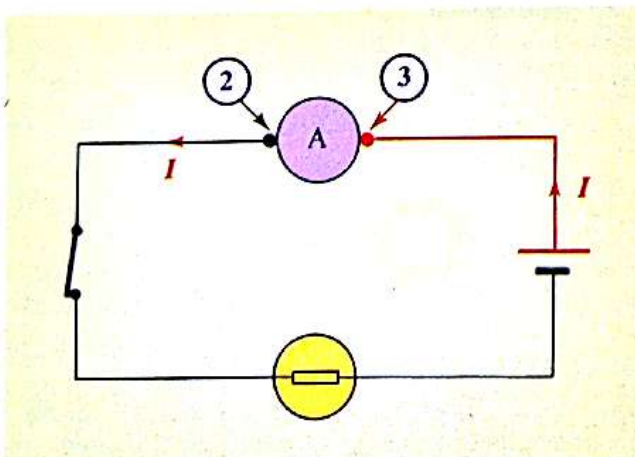
Si on ne connaît pas l'ordre de grandeur de l'intensité à mesurer, on choisira d'abord le *calibre* le plus élevé. Le calibre correspond à l'intensité du courant qui amène l'aiguille sur l'extrémité de la graduation.

- **Choisir le calibre le mieux adapté.** Si la déviation de l'aiguille ④ est faible, choisir un calibre ③ inférieur. Le calibre le mieux adapté est celui qui provoque la plus grande déviation possible de l'aiguille; par construction, c'est celui qui permet la mesure la plus précise (voir application 4).

- **Lire la déviation de l'aiguille** sur la graduation ⑤ noire (=).

- **Effectuer la détermination de I .**

- **Évaluer la précision de la mesure.** Utiliser l'indication de la classe de précision portée sur le cadran en ⑦ ou sur la notice de l'appareil.



Application 4 :

1/ Quelle est l'incertitude sur la mesure de l'intensité réalisée lors de l'application 3 précédente? La classe de l'appareil est 1,5.

2/ Le calibre utilisé est-il le mieux adapté?

1/ L'ampèremètre mesure une intensité de 0,28 A sur le calibre 1 A. L'incertitude sur la mesure est donc :

$$\Delta I = \frac{1,5}{100} \times 1 = 0,015 \text{ A.}$$

Le taux d'incertitude vaut :

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{0,015}{0,28} \approx 0,05 \text{ soit } 5\%.$$

2/ L'intensité étant inférieure à 0,5 A, ce calibre peut être utilisé. Sur ce calibre l'incertitude sur toute lecture vaut :

$$\Delta I = \frac{1,5}{100} \times 0,5 = 0,0075 \text{ A.}$$

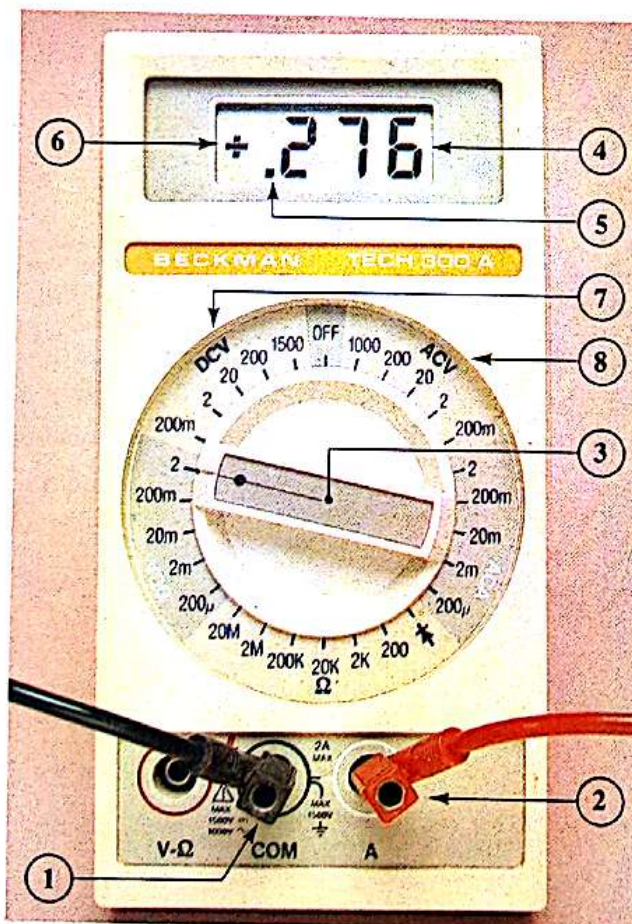
Le taux d'incertitude est :

$$\frac{\Delta I}{I} \approx \frac{0,0075}{0,28} \approx 0,025 \text{ soit } 2,5\%.$$

La mesure est plus précise sur le calibre 0,5 A qui est donc mieux adapté que le calibre 1 A.

On a donc intérêt à toujours utiliser le calibre pour lequel la déviation de l'aiguille est la plus grande possible (en restant évidemment dans les limites de la graduation!)

Fiche technique multimètre numérique



De nouveaux multimètres numériques à affichage à cristaux liquides sont mis maintenant à la disposition des techniciens; ces appareils allient souplesse, fiabilité, précision et robustesse. Leur prix est très compétitif.

Pour une utilisation en ampèremètre on l'insère en série dans le circuit de mesure en le branchant entre les bornes COM (1) et A (2). Un seul sélecteur (3) permet de choisir la fonction et le calibre.

- ① et ② bornes de branchement
- ③ sélecteur de fonctions et de calibres
- ④ affichage de la grandeur mesurée
- ⑤ point décimal
- ⑥ affichage du sens du courant
- ⑦ calibres correspondant à une mesure d'intensité en courant continu (DCA)
- ⑧ calibres correspondant à une mesure d'intensité efficace en courant alternatif (ACA)

Exemple de mesure

• DCA 2, mesure de l'intensité en ampères (4) avec un point décimal (5) : +0,276 A; le courant continu (DCA) ne doit pas dépasser 2 A. La mesure est directe sans aucun calcul.

• Le + indique que le courant entre par la borne A et sort par la borne COM; si on inverse les bornes l'appareil indique -0,276 A.

Cet appareil nous dispense donc des calculs de proportionnalité et du respect du sens de branchement.

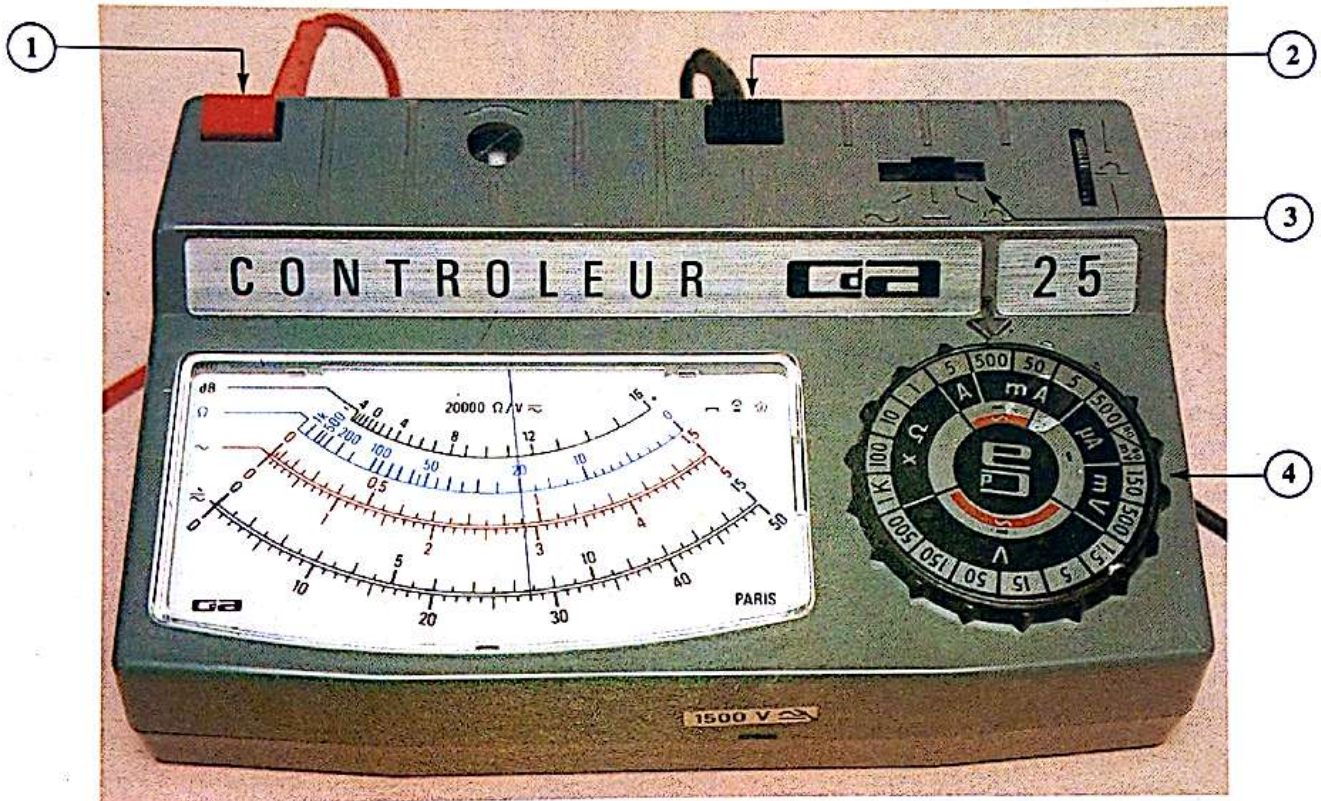
Fiche technique

contrôleur, ou multimètre à aiguille

Le contrôleur, ou multimètre, couramment utilisé, possède plusieurs fonctions. Il peut servir non seulement d'ampèremètre, mais permet aussi de mesurer des tensions (voir chapitre 4) et d'autres grandeurs (ohmmètre).

Pour l'employer comme ampèremètre, prendre les mêmes précautions que pour l'ampèremètre à aiguille.

Après avoir sélectionné la mesure en courant continu (bouton ③), choisir la fonction désirée et le calibre en tournant le sélecteur ④. En courant continu, il faut se référer à l'une des deux échelles noires du bas (soit la graduation à 15 divisions, soit la graduation à 50 divisions), selon le calibre choisi. La classe de cet appareil est 1,5 en courant continu.

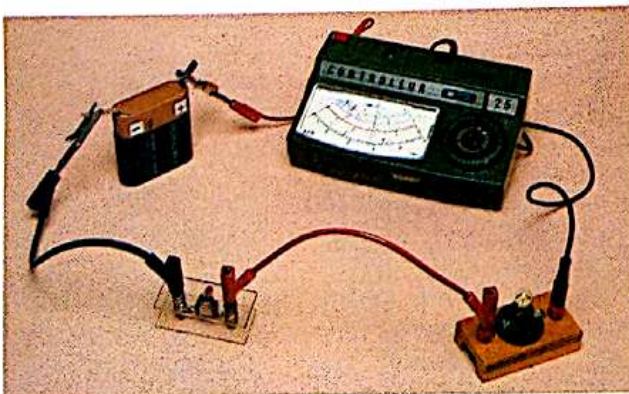


① borne d'entrée du courant

② borne de sortie du courant

③ commutateur continu (-), alternatif (~), ohmmètre (Ω)

④ sélecteur de fonction de calibre



Exemple de mesure

- Calibre : 500 mA; facteur de proportionnalité $k = 10 \text{ mA/div}$.
- Déviation : 28 divisions.
- $I = k \cdot d = 280 \text{ mA}$.

- Incertitude : $\Delta I = \frac{1,5}{100} \times 500 = 7,5 \text{ mA} \approx 8 \text{ mA}$.

- Taux d'incertitude $\frac{\Delta I}{I} = \frac{7,5}{280} = 0,027$, soit 2,7%.

I est donc égale à 280 mA à $\pm 8 \text{ mA}$ près.

EXERCICES

Faire le point

- Définir l'intensité du courant électrique.
- Quelles sont les unités d'intensité et de quantité de charges électriques?
- Un ampèremètre doit-il être branché en série ou en dérivation?
- Qu'appelle-t-on « calibre » d'un ampèremètre?
- Définir la classe d'un appareil à aiguille.

Quantité d'électricité, intensité et débit des porteurs de charge

2.1 Sachant que pour faire briller une lampe type lampe de poche, il faut un courant d'intensité 0,3 A dans le filament, déterminer le débit d'électrons correspondant.

2.2 Un courant de $1 \mu\text{A}$ (10^{-6} A) passe pendant 24 h dans un conducteur. Quelle est la quantité d'électricité transportée pendant ce temps? Quel est le débit d'électrons correspondant?

2.3 Une quantité d'électricité de 0,1 Ah est débitée en 10 minutes. Quelle est l'intensité du courant?

2.4 Une lampe à incandescence alimentée par une batterie d'accumulateurs est parcourue par un courant d'intensité 0,25 A. Elle fonctionne 1 h 30 par jour. Calculer en coulombs et en ampères-heures la quantité d'électricité qui la traverse en une semaine.

2.5 Dans un tube de télévision, le spot lumineux est dû à l'impact du faisceau d'électrons sur l'écran fluorescent. Sachant que ce faisceau a une intensité de 1 mA, combien d'électrons arrivent par minute sur l'écran?

2.6 Un fil de cuivre est traversé par un courant de 5 A; sa section est de 1 mm^2 .

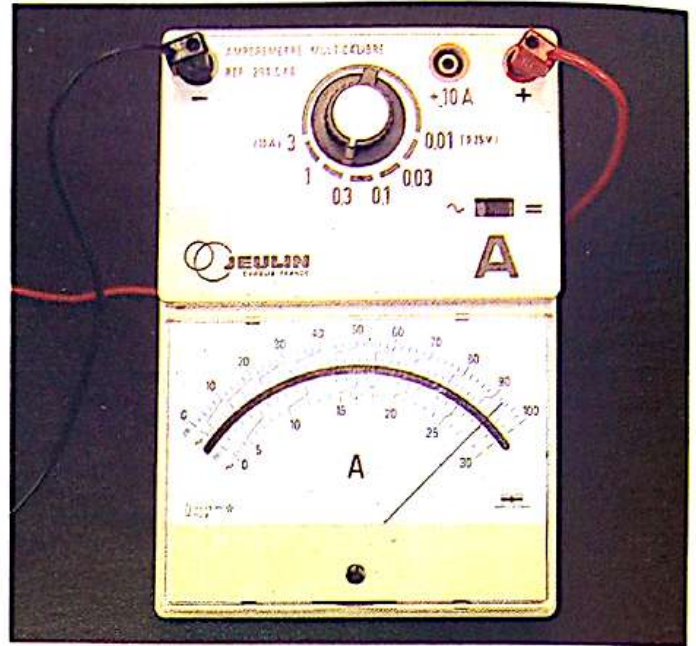
1/ Déterminer le débit d'électrons correspondant à ce courant.

2/ En supposant que chaque atome de cuivre participe à la conduction du courant en libérant un électron et que tous ces électrons soient animés d'une même vitesse parallèlement au fil, déterminer cette vitesse.

Données : masse volumique du cuivre : $9000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; masse de $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ atomes de cuivre = 63,5 g.

Mesures d'intensité

2.7 L'ampèremètre de la photographie ci-après mesure l'intensité d'un circuit. Répondre aux questions suivantes et justifier votre réponse.



1/ Mesure-t-il un courant continu?

2/ Quel est le calibre utilisé?

3/ Sur quelle graduation doit-on lire la déviation de l'aiguille?

4/ L'aiguille est fixée sur la graduation 28 ou 93 environ. Quelle est l'intensité mesurée par l'ampèremètre?

2.8 Pour mesurer l'intensité du courant qui traverse un ampèremètre, on utilise différents calibres. Complétez le tableau sachant que la graduation comporte 100 divisions.

calibre (A)	5	1	0,5	0,1	0,01
déviations (div.)				62	
intensité (A)					

Serait-il effectivement possible de lire sur la graduation de l'ampèremètre toutes les déviations calculées?

2.9 Un ampèremètre est gradué de 0 à 100. Il possède les calibres suivants : 5 A; 1 A; 100 mA; 10 mA; 1 mA. On veut mesurer des courants dont l'ordre de grandeur est indiqué dans le tableau ci-dessous. Complétez ce tableau.

intensité mesurée	0,9 A	0,15 A	0,09 A	2 mA
calibre le mieux adapté				
nombre de divisions correspondantes				

2.10 Un ampèremètre possède 3 calibres : 5 A, 3 A, 1 A et son cadran 150 divisions; compléter le tableau ci-après.

calibre	5 A		3 A		1 A	
déviaton (div.)	60	100	120	45	140	80
intensité (A)						
calibre le mieux adapté (A)						

2.11 L'ampèremètre dont le cadran est photographié ci-dessous est utilisé sur le calibre 0,01 A. Calculer l'intensité du courant et l'exprimer en A, en mA, en μ A.



2.14 Un appareil numérique effectue une mesure électrique en courant continu. En observant attentivement la photographie ci-dessous, répondre aux questions suivantes :

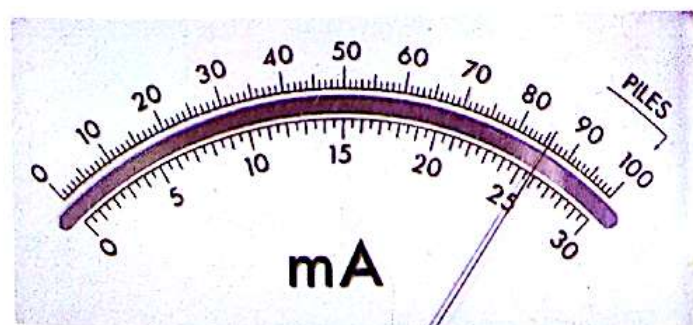


- 1/ Quelle grandeur électrique mesure-t-il?
- 2/ Quel est le calibre utilisé?
- 3/ Quelle est la valeur de la grandeur mesurée?
- 4/ Pour améliorer la précision de la mesure, pouvait-on utiliser les calibres 20 mA, 2 mA et 200 μ A?

2.12 Au cours d'une mesure, l'aiguille s'est arrêtée entre deux divisions. Sachant que le calibre utilisé est de 10 mA et que le cadran comporte 100 divisions, entre quelles valeurs l'intensité du courant continu mesurée est-elle comprise?
On lit sur la graduation noire.

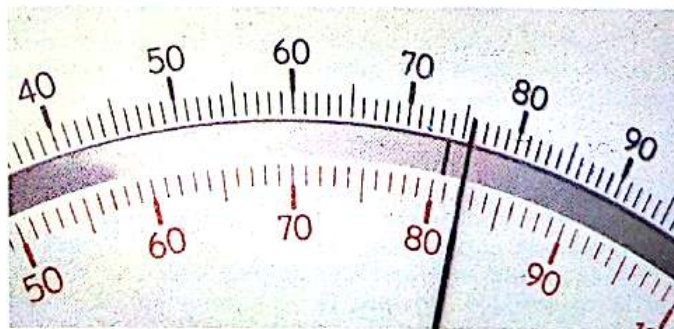


2.13 Certains appareils possèdent deux graduations. Selon le calibre utilisé, on peut prendre l'une ou l'autre.



- 1/ L'appareil est utilisé sur le calibre 10 mA. Calculer à partir des deux lectures l'intensité détectée. Quelle est la graduation la plus commode?
- 2/ On suppose maintenant que l'appareil est utilisé sur le calibre 300 mA. Quelle est l'intensité mesurée?

2.15 Le cadran de la photographie ci-dessous représente une lecture sur le cadran d'un ampèremètre. La partie brillante est un miroir où l'on peut voir le reflet de l'aiguille. On considère que l'objectif de l'appareil photographique correspond à l'œil d'un observateur.



- 1/ L'observateur est-il bien placé pour faire la lecture?
- 2/ Le calibre employé est 0,1 A; peut-on évaluer l'intensité mesurée? La graduation comporte 100 divisions.

Précision d'une mesure Incertitude et taux d'incertitude

2.16 La photographie ci-après représente un multimètre utilisé en ampèremètre au cours d'une mesure d'intensité.



- 1/ Comment peut-on s'assurer qu'il mesure une intensité d'un courant continu? Quel est le calibre utilisé?
- 2/ L'aiguille est sur la graduation 18. Calculer la valeur de l'intensité.
- 3/ La classe de précision de l'appareil est 1,5. Quelle est l'incertitude ΔI sur la mesure? Quel est le taux d'incertitude?

2.17 Un ampèremètre de classe 2, utilisé sur le calibre 300 mA et comportant 150 divisions, mesure l'intensité d'un courant continu. L'aiguille se fixe sur la graduation 120.

- 1/ Donner l'intensité du courant.
- 2/ Donner le taux d'incertitude de la mesure.
- 3/ L'intensité varie : l'aiguille se fixe alors sur la graduation 21. Répondre aux mêmes questions. Comparer la précision des deux mesures et conclure.

2.18 Un ampèremètre possède une échelle de graduation de 100 divisions. Le constructeur déclare une incertitude de construction de 1,5 division par défaut ou par excès. Pour une intensité donnée, l'aiguille se fixe, sur le calibre 1 A, en face de la graduation 38; sur le calibre 0,5 A, en face de la graduation 77.

- 1/ Quelle est l'intensité mesurée sur chaque calibre?
- 2/ Les résultats sont-ils compatibles? Quelle est la meilleure mesure?

2.19 Un multimètre numérique est employé en ampèremètre. Il possède en particulier les calibres 200 mA et 2 A.

- 1/ Sur le calibre 200 mA, il indique 185.5. Quelle est l'intensité mesurée?
- 2/ Il effectue la même mesure mais sur le calibre 2 A; il affiche .185. Quelle est l'intensité mesurée?
- 3/ Le constructeur indique pour le calcul de l'incertitude de mesure que ΔI est égale à 0,25 % de la lecture plus une erreur d'une unité sur le dernier chiffre significatif à droite de la lecture (par exemple, sur .185, on ajoute 0,001 A au 0,25 % de la lecture). Calculer le taux d'incertitude sur les deux mesures. Conclusion.

Électrolyse et intensité

2.20 Un fil d'argent de longueur 5 cm, de diamètre 2 mm, est utilisé comme cathode dans une solution de nitrate d'argent (elle contient des ions Ag^+) parcourue par un courant d'intensité de 1 A.

Au bout de combien de temps le fil a-t-il doublé son diamètre, la longueur restant pratiquement constante?

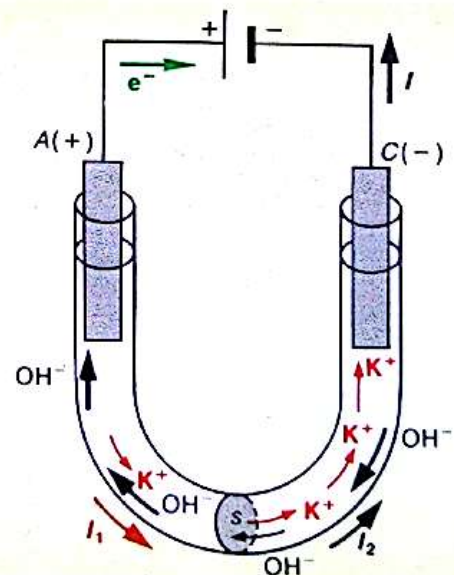
Données : masse volumique de l'argent : $10,5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$; 108 g d'argent sont déposés par le passage de 96 500 coulombs.

2.21 On veut vérifier la graduation d'un ampèremètre par un phénomène d'électrolyse. On met en série un électrolyseur à cathode de cuivre contenant du sulfate de cuivre II (Cu^{2+}), un ampèremètre et un générateur. Le courant passe pendant trois heures. L'aiguille de l'ampèremètre se fixe sur la division 76 (le cadran porte 100 graduations). La masse de cuivre déposé à la cathode en fin d'expérience est de 2,75 g.

- 1/ Faire un schéma du circuit électrique utilisé pour réaliser l'expérience.
- 2/ L'ampèremètre est-il bien gradué si le calibre utilisé est 1 A et si la classe de l'appareil est 2?

Donnée : 63,5 g de cuivre sont déposés par 193 000 coulombs.

2.22 Dans un tube en U, on verse une solution de potasse contenant les ions K^+ et OH^- . La conduction du courant dans l'électrolyte est due essentiellement aux ions K^+ et OH^- : les ions positifs K^+ véhiculent des charges positives dans un sens et créent un courant partiel d'intensité I_1 ; les ions négatifs OH^- créent un courant I_2 dans le même sens que I_1 et, pourtant, ils circulent en sens inverse.



2.22

- 1/ Indiquer le sens de déplacement des ions.
- 2/ L'intensité totale débitée par le générateur est de 1,5 A. On sait d'autre part que le rapport des vitesses en régime permanent des ions K^+ et OH^- est égal à :

$$\frac{v(\text{K}^+)}{v(\text{OH}^-)} = 0,38.$$

a/ Calculer les intensités des courants partiels dus à chaque espèce d'ions.

b/ Calculer le nombre d'ions OH^- et K^+ qui passent par seconde à travers une section du tube.

Capacité d'un accumulateur

2.23 Une automobile est équipée d'une batterie dont la capacité, c'est-à-dire la quantité d'électricité totale qu'elle peut débiter, vaut 30 A.h.

1/ Pour faire démarrer le moteur, la batterie fournit un courant d'intensité moyenne 90 A durant 4 s. Calculer la quantité d'électricité débitée par la batterie au cours d'un démarrage. Si la batterie n'était pas rechargée, combien de démarrages pourrait-on effectuer?

2/ Le dispositif d'éclairage de la voiture consomme environ 10 A. Moteur arrêté, combien de temps la batterie peut-elle alimenter ce dispositif?

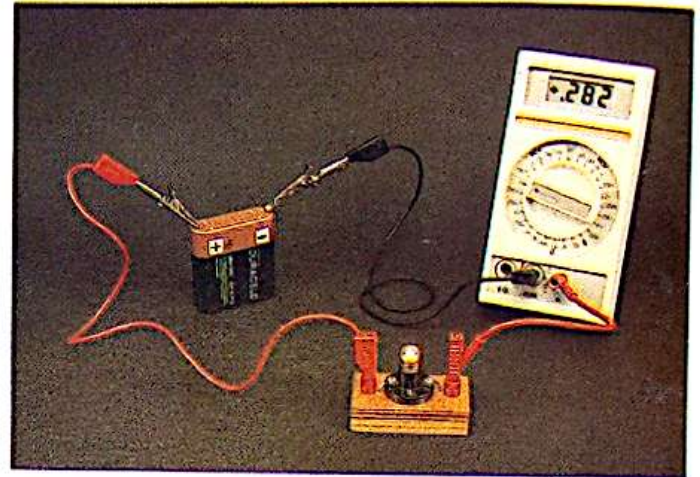
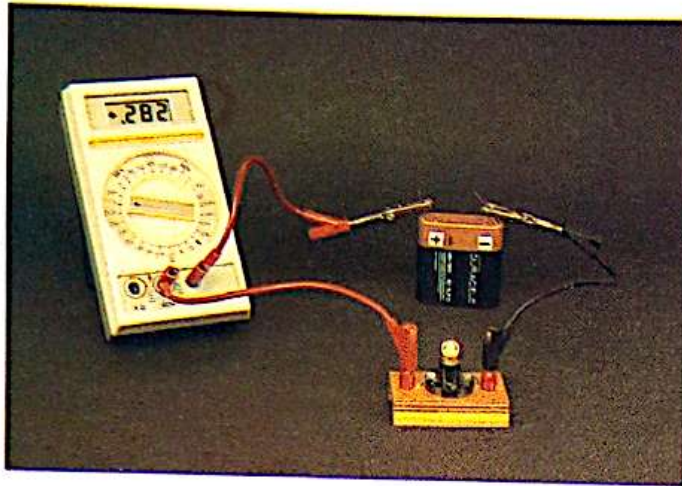
2.24 La capacité d'un générateur est la quantité d'électricité qu'il peut fournir.

1/ Une batterie d'accumulateurs d'automobile a une capacité de 42 A.h. Par inadvertance, les veilleuses restent allumées. Les quatre lampes, branchées en dérivation aux bornes de la batterie, sont parcourues chacune par un courant d'intensité 0,15 A. Pendant combien de temps les veilleuses peuvent-elles fonctionner (théoriquement)?

2/ Une calculatrice possède un accumulateur de 0,28 A.h. Combien de temps peut-elle rester allumée, sans recharge intermédiaire, sachant qu'elle est parcourue en moyenne par une intensité de 0,3 mA? Conclure.

3.

Propriétés des courants



1. L'indication donnée par l'ampèremètre ne dépend pas de la position de ce dernier dans un circuit série.

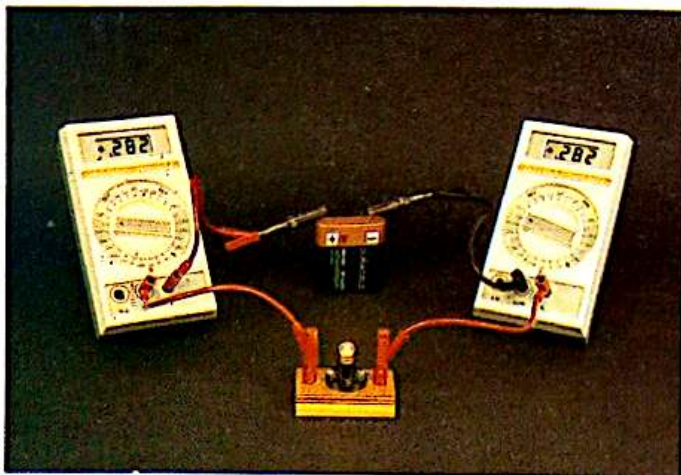
3.1 circuit série

3.1.1 intensité dans un circuit série

Plaçons un ampèremètre en différents points d'un circuit série (photo 1). L'ampèremètre donne toujours la même indication :

- L'intensité est la même en tout point d'un circuit série.

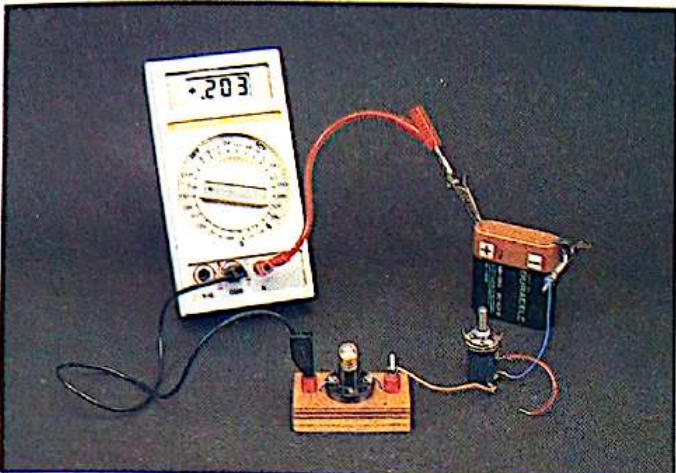
Le débit des électrons est donc le même à travers n'importe quelle section du circuit; les électrons ne peuvent s'accumuler dans un élément du circuit, ni s'échapper de la chaîne conductrice.



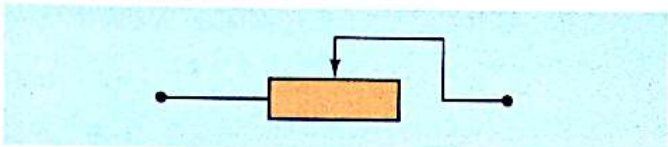
2. Si on introduit un deuxième ampèremètre de bonne qualité dans le circuit, l'indication donnée par le premier ne change pas; on peut en conclure qu'un ampèremètre branché en série ne modifie pas l'intensité du courant dans un circuit.

3.1.2 réglage de l'intensité

Il est possible de régler l'intensité du courant dans un circuit en utilisant un *rhéostat* (photo 3). Nous étudierons le principe d'un tel dipôle au chapitre 7.



3. Le rhéostat (à droite sur la photo) est utilisé pour faire varier l'intensité du courant dans le circuit. Son branchement s'effectue entre la borne centrale et l'une des deux autres bornes.



4. Rhéostats de type radio et leur représentation symbolique.

3.2 circuits parallèles ou en dérivation

3.2.1 courants dérivés

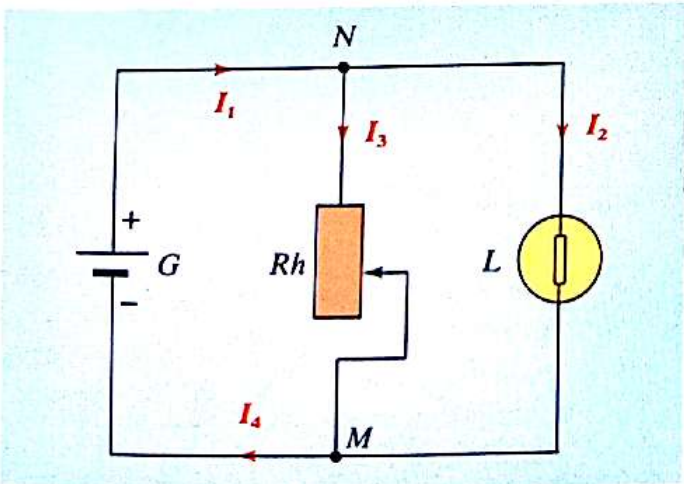
Considérons le circuit de la figure 5. Ce circuit possède trois branches :

- la branche principale *NGM* qui comporte le générateur,
- les deux dériviations *NRhM* et *NLM*.

N et *M* sont des nœuds; on appelle nœud le point de raccordement d'au moins trois branches.

La fiche expérimentale (voir page 29) montre que :

$$I_1 = I_2 + I_3 = I_4$$

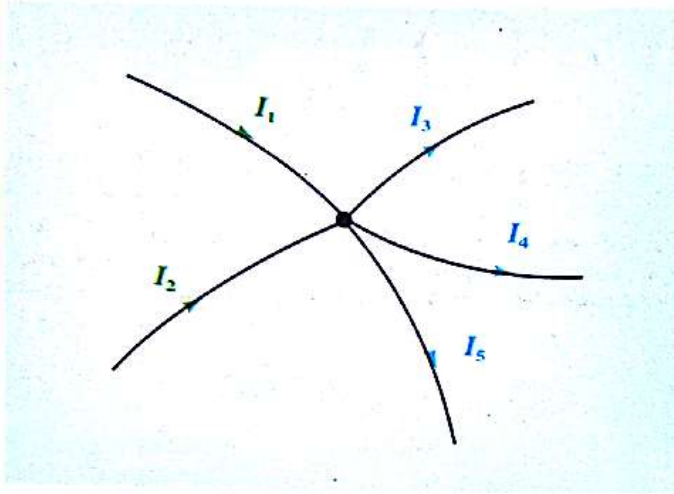


5. Un circuit à trois branches.



Nous pouvons généraliser ce résultat et énoncer la *loi des nœuds* (fig. 6) :

- La somme des intensités des courants qui arrivent à un nœud est égale à la somme des intensités des courants qui en repartent.



$$6. I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5$$

Interprétons ce résultat. Circulant en sens opposé au sens du courant, les électrons qui arrivent au nœud *M* se répartissent dans chacune des deux dérivations : ils se retrouvent au nœud *N* pour rejoindre le générateur.

Cette loi des nœuds traduit le principe général de conservation des charges électriques.

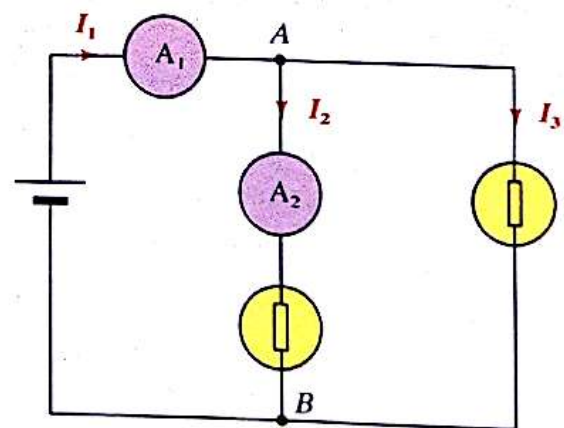
Application 1 :

Les deux ampèremètres A_1 et A_2 ci-contre sont deux contrôleurs ; le sélecteur est sur le calibre 500 mA ; la graduation comporte 50 divisions. On lit sur A_1 : 48 div et sur A_2 : 23 div. Calculer les intensités dans chaque branche du circuit.

Calculons les intensités I_1 et I_2 . On obtient, avec $k = 500/50 = 10 \text{ mA/div}$:

	calibre	I_1	I_2
×10	50 div	48 div	23 div
	500 mA	480 mA	230 mA

Appliquons la loi des nœuds au nœud *A* ou au nœud *B* :



$$I_1 = I_2 + I_3$$

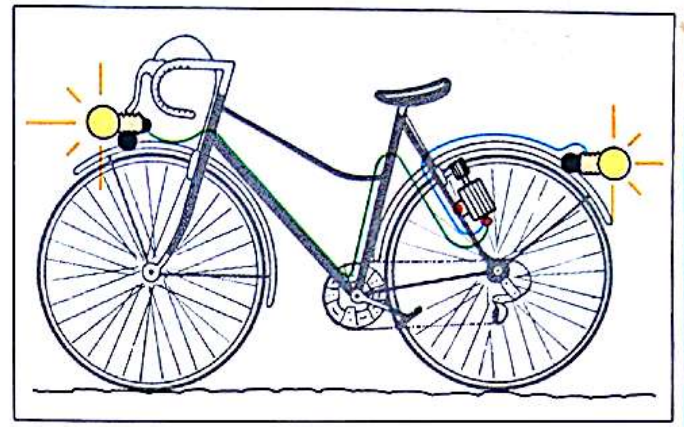
$$I_3 = I_1 - I_2 = 480 - 230 = 250$$

$$I_3 = 250 \text{ mA.}$$

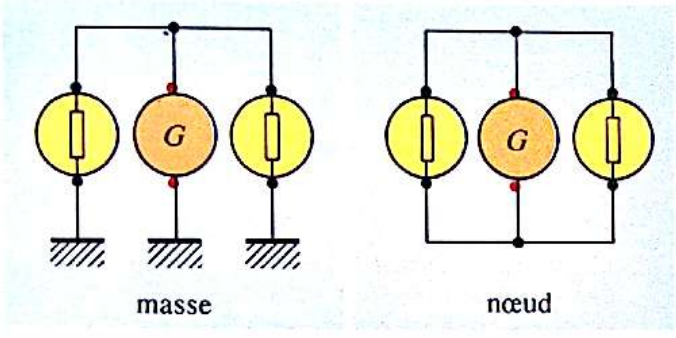
3.2.2 circuits avec masse

La lampe du phare d'une bicyclette est reliée à l'alternateur par un seul fil électrique. En fait l'autre borne de la lampe est reliée électriquement à l'autre borne de l'alternateur par l'intermédiaire du cadre métallique de la bicyclette, dont on dit alors qu'il joue le rôle de masse (fig. 7).

Lorsque plusieurs appareils sont branchés en dérivation, la masse joue le rôle d'un nœud; c'est le cas dans le circuit électrique d'une bicyclette (fig. 8) ou d'une voiture (la carrosserie tient lieu de masse) et dans de nombreux montages électroniques.



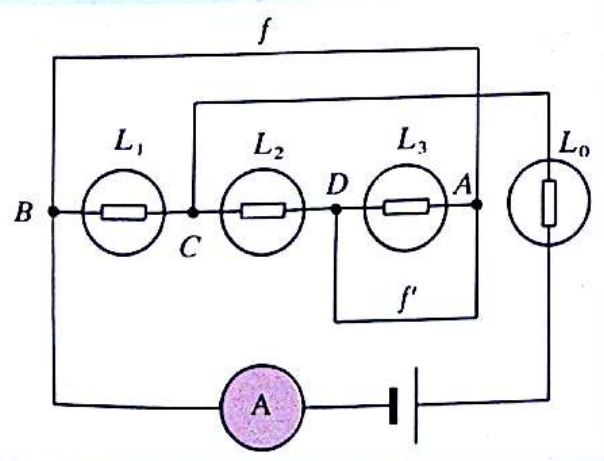
7. Pour chaque lampe, le 2^e fil est remplacé par la carcasse métallique (cadre, garde-boue) de la bicyclette : c'est la masse des circuits. Les bornes du générateur sont figurées en rouge.



8. Schéma du circuit de la figure 7. Bien que représenté trois fois, le symbole de la masse correspond à un seul et même conducteur.

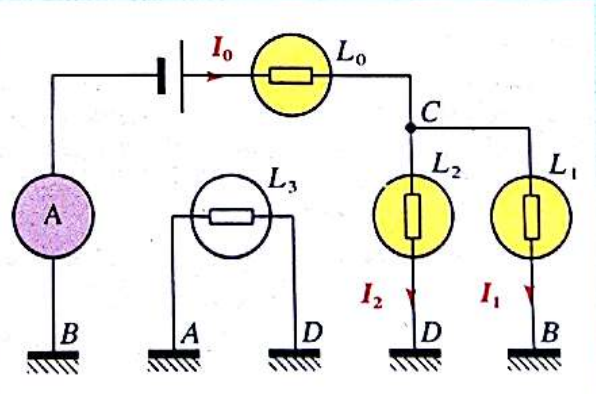
Application 2 :

Un étudiant a schématisé le montage qu'il a effectué selon la figure ci-contre. Les quatre lampes sont identiques; f et f' sont deux fils de court-circuit. Après avoir simplifié le schéma en introduisant la notion de masse, calculer l'intensité dans chaque lampe. L'ampèremètre A indique 0,3 A.



Les point A, B, C et D sont des nœuds puisque en chacun de ces points arrivent au moins trois

conducteurs. Les points B, A et D sont reliés par les fils f et f' . Faisons jouer à ces deux fils le rôle de la masse et redessinons alors le montage.



Sur le nouveau schéma, nous voyons que L_3 est court-circuitée par la masse : l'intensité dans cette lampe est donc nulle. L_1 et L_2 sont en parallèles. Nous pouvons donc en conclure, puisqu'elles sont identiques, que $I_1 = I_2$. La lampe L_0 est traversée par le courant principal, soit 0,3 A. En appliquant la loi des nœuds en C :

$$I_1 = I_2 = \frac{I_0}{2} = 0,15 \text{ A.}$$

3.3 surintensité protection d'un circuit

Tous les éléments d'un circuit sont plus ou moins fragiles : un courant trop intense peut les détruire. Le constructeur indique généralement l'intensité maximale de fonctionnement. Ainsi une lampe (3,5 V; 0,3 A) est en *surintensité* si elle est traversée par un courant supérieur à 0,3 A (par exemple 0,6 A) : elle brillera davantage mais sera rapidement détruite.

Aussi protège-t-on les éléments du circuit par un fusible qui fond et coupe le courant si l'intensité devient dangereuse.

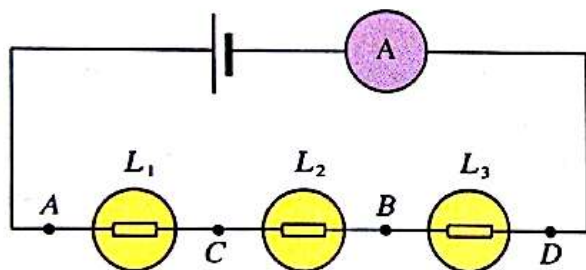
Il peut y avoir *surintensité pour le générateur* si celui-ci est mis en *court-circuit*. Le dégagement de chaleur provoqué par un tel courant (d'intensité égale à plusieurs centaines d'ampères dans le cas d'une batterie d'accumulateurs) risque de provoquer un incendie.

De même, il est dangereux de brancher trop de dérivations aux bornes d'un même générateur : l'intensité débitée par ce dernier peut devenir très importante.

Dans les habitations, où tous les appareils sont branchés en dérivation «aux fils E.D.F.», le *disjoncteur* coupe automatiquement le courant lorsque l'intensité dépasse une limite fixée (par exemple 30 A pour un contrat «Confort»).

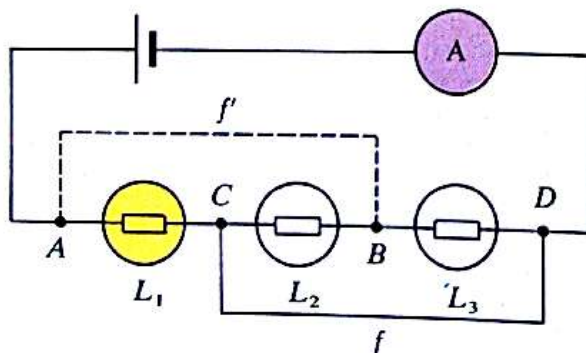
Application 3 : Étude d'un court-circuit

Un circuit série comporte trois lampes identiques. Un ampèremètre mesure l'intensité qui traverse le générateur.



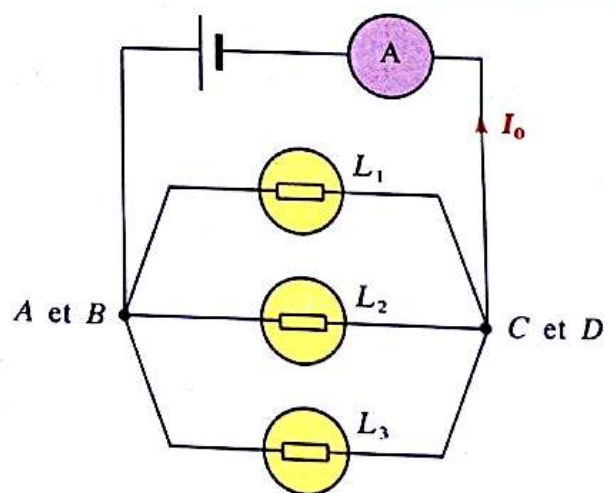
1/ On court-circuite par un fil de jonction les deux points C et D du circuit. Que peut-on dire de l'intensité dans chaque lampe ?

2/ On ajoute un second fil de court-circuit entre A et B. L'ampèremètre indique 0,9 A. Quelle est l'intensité qui traverse chacune des lampes ?



1/ Lorsqu'on court-circuite les points C et D, tout le courant qui arrive en C est pratiquement dévié par le fil de court-circuit. L'intensité qui traverse les lampes L_2 et L_3 est quasiment nulle. Quant à la lampe L_1 , elle est alors traversée par un courant certainement plus intense qu'avant le court-circuit.

2/ On ajoute un fil f' entre A et B. Pour mieux comprendre ce qui se passe, on redessine le circuit en considérant que le point A et le point B constituent un même nœud et que C et D constituent un autre nœud. Il est évident alors qu'entre ces deux nœuds les trois lampes sont branchées en parallèle.

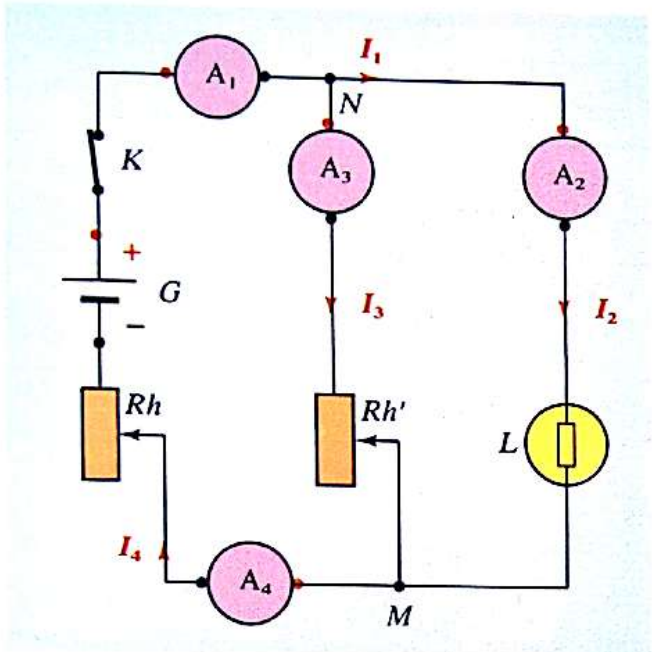


Appliquons la loi des nœuds : $I_0 = I_1 + I_2 + I_3$.
Les trois lampes sont identiques :

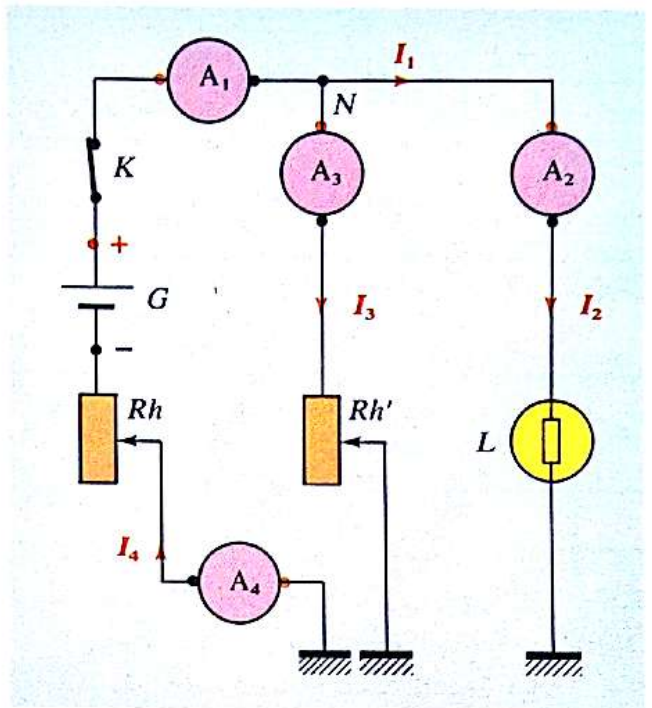
$$I_1 = I_3 = I_2 = \frac{I_0}{3} = 0,3 \text{ A.}$$

Fiche expérimentale

loi des nœuds



9a. Circuit d'étude de la loi des nœuds.



9b. Circuit équivalent avec masse.

Réalisons le circuit de la figure 9, qui comporte trois branches.

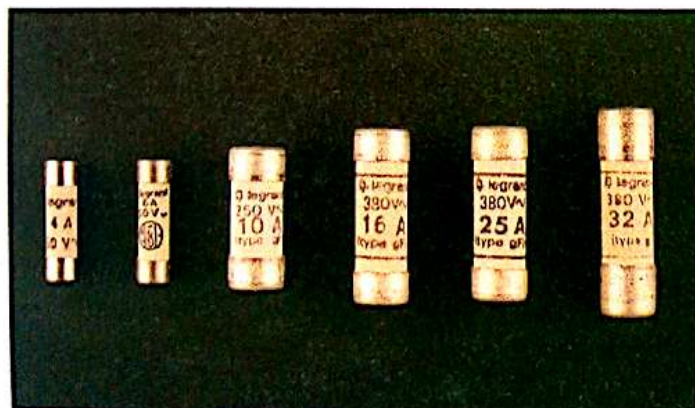
A_1, A_2, A_3, A_4 sont des ampèremètres qui permettent de mesurer les intensités I_1, I_2, I_3, I_4 . Les rhéostats Rh_1 et Rh_2 permettent de modifier ces intensités.

Différentes mesures sont regroupées ci-contre (I en ampères).

Nous constatons que


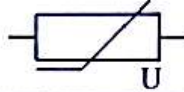



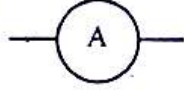
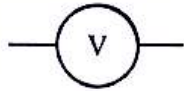
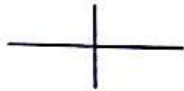
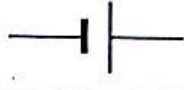

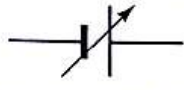

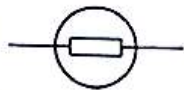

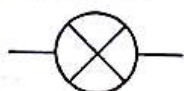
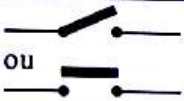

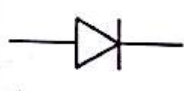


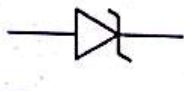
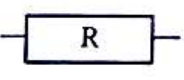
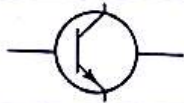
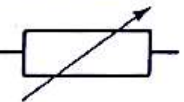

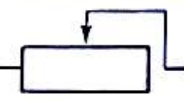
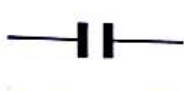
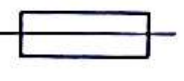

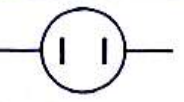

- $I_1 = I_2 + I_3 = I_4$;
- l'intensité est la même en chaque point d'une même branche; les ampèremètres A_1 et A_4 donnent la même indication.

I_1	I_2	I_3	$I_2 + I_3$	I_4
0,30	0,10	0,20	0,30	0,30
0,40	0,05	0,35	0,40	0,40
0,56	0,26	0,30	0,56	0,56



10. Fusibles de divers calibres, utilisés pour protéger les installations électriques domestiques.

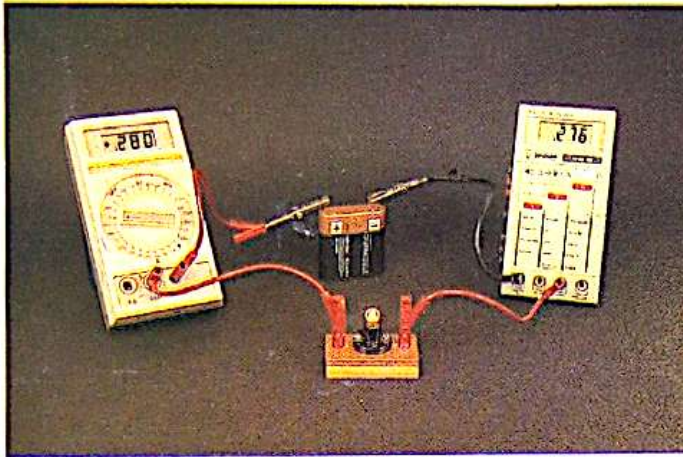
symboles utilisés en électricité

symbole	signification	symbole	signification
	courant continu		conducteur dont la résistance dépend de la tension, ou V.D.R., ou varistance
	courant alternatif		conducteur dont la résistance décroît avec la température, ou C.T.N., ou thermistance
	symboles pour appareils utilisables en courant continu et en courant alternatif		ampèremètre
• ou ○	bornes, connexion de deux conducteurs		voltmètre
	conducteurs se croisant sans connexion		pile ou accumulateur (le trait long représente la borne positive, le trait court la borne négative)
	croisement de conducteurs connectés		pile ou accumulateur de force électromotrice variable
	masse		lampe à incandescence
	terre		lampe témoin
 ou 	interrupteur ouvert ou contact repos		diode à jonction
 ou 	interrupteur fermé ou contact travail		diode Zener
	conducteur ohmique de résistance R		transistor à jonction NPN
	conducteur ohmique de résistance variable		transistor à jonction PNP
	rhéostat		condensateur non polarisé
	fusible ou coupe-circuit		condensateur à capacité variable
	cuve à électrolyse, ou électrolyseur, ou voltamètre		inductance, ou self

Faire le point

- Que peut-on dire de l'intensité du courant dans un circuit série?
- Énoncer la loi des nœuds.
- La masse d'un circuit est-elle équivalente à un nœud?
- Quel est le rôle du disjoncteur dans une installation électrique?

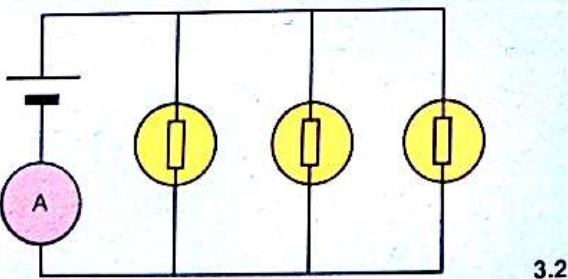
3.1 Dans le circuit série de la photographie ci-dessous, on a placé deux ampèremètres; l'un indique une intensité de 0,280 A, l'autre de 0,276 A.



Cette différence d'indication est-elle due :

- 1/ A la place des appareils?
- 2/ A l'incertitude de mesure des appareils?
- 3/ A la mauvaise qualité de la pile?
- 4/ A l'inadaptation de la lampe (6 V; 0,3 A) à la pile?

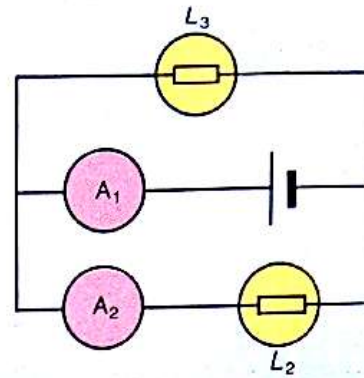
3.2 Sur une pile, on branche trois lampes identiques en dérivation. L'ampèremètre indique 0,9 A. Quelle est l'intensité qui traverse chaque lampe?



3.3 Dans le montage ci-après, les ampèremètres A_1 et A_2 indiquent respectivement les intensités :

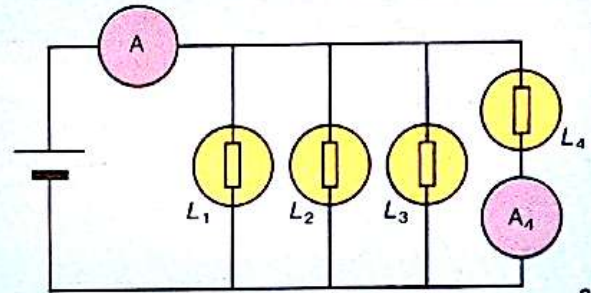
$$I_1 = 0,5 \text{ A et } I_2 = 0,3 \text{ A.}$$

- 1/ Quelle est la branche principale? Indiquez le sens du courant dans les trois branches.
- 2/ Quelle est l'intensité du courant qui traverse la lampe L_3 ?



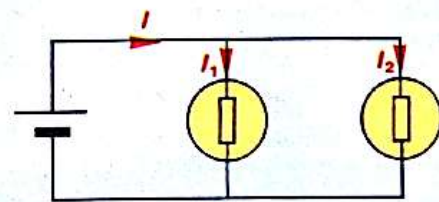
3.3

3.4 Calculer l'intensité du courant qui parcourt les lampes L_1 , L_2 et L_3 sachant qu'elles sont identiques mais différentes de L_4 . Les ampèremètres A et A_4 sont branchés sur le calibre 1,6 A; ils comportent 160 divisions. Les aiguilles s'arrêtent respectivement sur la 91^e et sur la 19^e division.



3.4

3.5 Soit le montage ci-dessous. On branche successivement des piles différentes et on effectue les mesures inscrites dans le tableau. Compléter celui-ci.

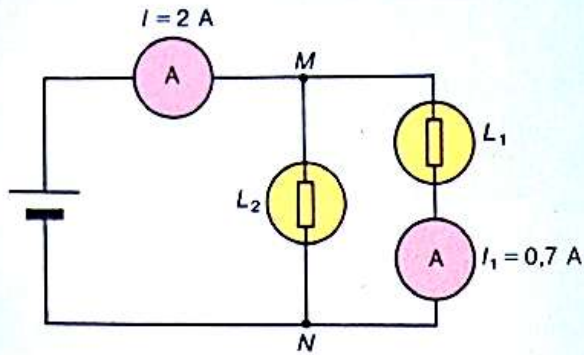


3.5

I	I_1	I_2
	1,5 A	3,2 A
4,8 A	3,2 A	
300 mA		150 mA
0,50 A	230 mA	

3.6 Entre deux points A et B d'un circuit (circuit principal), il y a deux dérivation; dans l'une d'elles, il est passé 200 C en 125 s; dans l'autre, un ampèremètre indique 1,2 A. Quelle est l'intensité du courant dans le circuit principal?

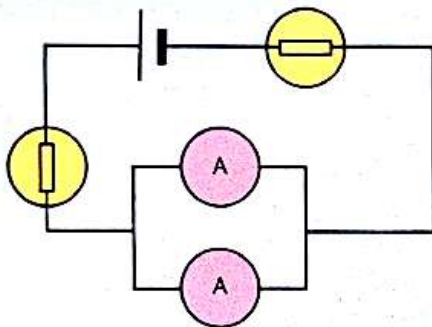
3.7 On considère le montage ci-dessous.



3.7

- 1/ Quelle est l'intensité du courant traversant L_2 ?
- 2/ Calculer le nombre d'électrons qui chaque seconde :
 - a/ arrivent au nœud N;
 - b/ traversent les lampes L_1 et L_2 ;
 - c/ rentrent dans le générateur.

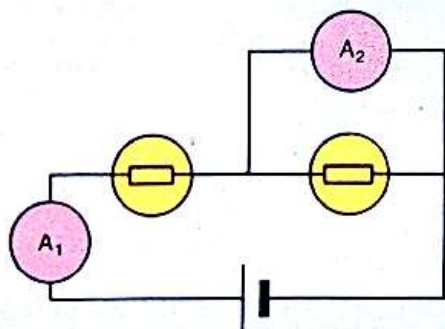
3.8 Un circuit série est parcouru par un courant de 0,8 A.



3.8

- 1/ On branche en série dans le circuit deux ampèremètres identiques. Que vaut l'intensité mesurée par chacun des appareils?
- 2/ On branche les deux ampèremètres identiques en parallèle comme l'indique le schéma. Quelle est l'intensité mesurée par chaque ampèremètre?

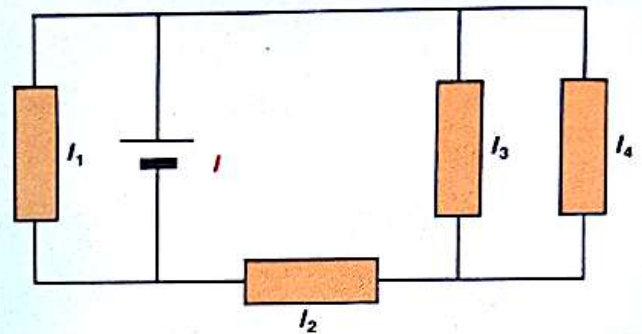
3.9 Dans le montage ci-dessous l'ampèremètre A_1 indique un courant d'intensité 0,3 A. Quel est l'ordre de grandeur de l'intensité mesurée par l'ampèremètre A_2 (ampèremètre de bonne qualité)?



3.9

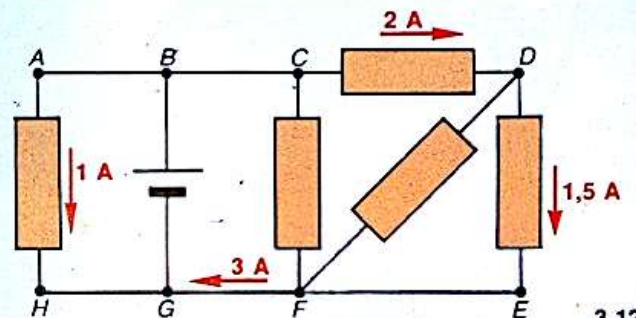
3.10 On désire mesurer avec exactitude l'intensité I du courant dans un circuit. L'ordre de grandeur de l'intensité est évalué à 8 A. On dispose de deux ampèremètres identiques dont le calibre le plus élevé est 5 A. Comment procéder pour mesurer l'intensité I ?

3.11 On donne pour les intensités dans les branches du montage ci-dessous : $I_1 = I_3$, $I_2 = 3I_4$, $I = 5$ A. Calculer I_1 , I_2 , I_3 , I_4 et déterminer le sens du courant dans chaque dipôle.



3.11

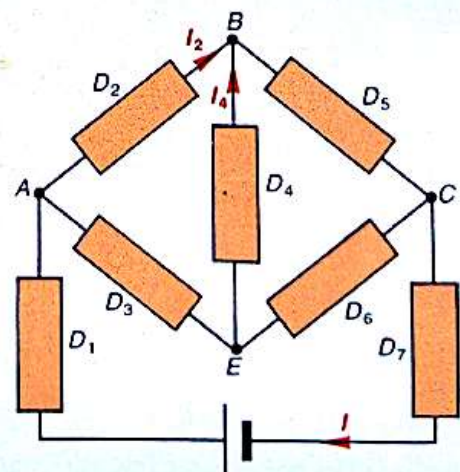
3.12 On considère le montage ci-dessous.



3.12

- 1/ Déterminer les intensités des courants dans les branches BC, GB, DF, CF.
- 2/ Quel est le débit d'électrons fourni par le générateur?

3.13 Un montage électrique comprend sept dipôles récepteurs. L'intensité I qui traverse la pile est de 500 mA; les intensités qui traversent les dipôles D_2 et D_4 sont respectivement égales à 300 mA et 100 mA.

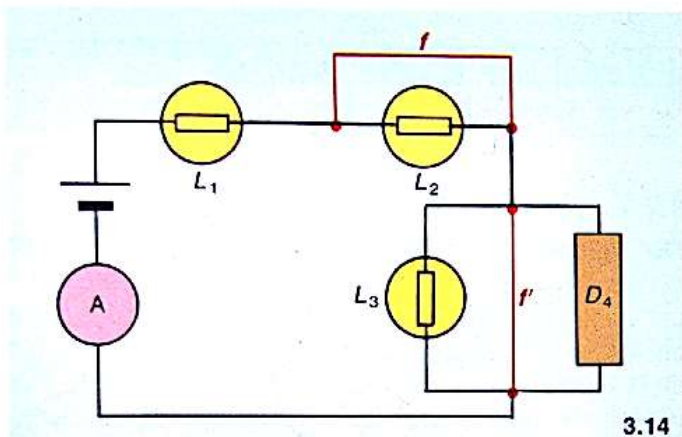


3.13

1/ Déterminer le sens et l'intensité du courant dans tous les dipôles. On justifiera la réponse en énonçant les propriétés des courants employés.

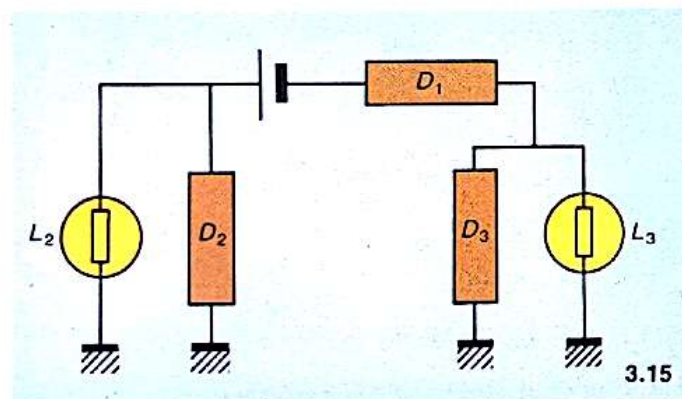
2/ Placer trois ampèremètres qui permettraient de mesurer les intensités I_1 , I_2 et I_4 .

3.14 Dans le montage ci-dessous, on a placé deux fils f et f' de jonction. L'ampèremètre indique 0,3 A. Quelles sont les intensités du courant dans les lampes L_1 , L_2 et L_3 , dans le dipôle D_4 et dans les fils f et f' ?



3.14

3.15 L'intensité qui circule dans D_1 est égale à 0,6 A, alors que celles qui circulent dans les lampes L_2 et L_3 sont respectivement égales à 0,2 A et 0,3 A.

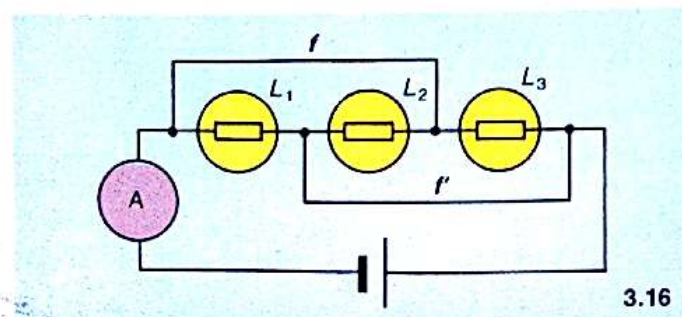


3.15

1/ Déterminer le sens et l'intensité du courant qui circule dans chaque dipôle.

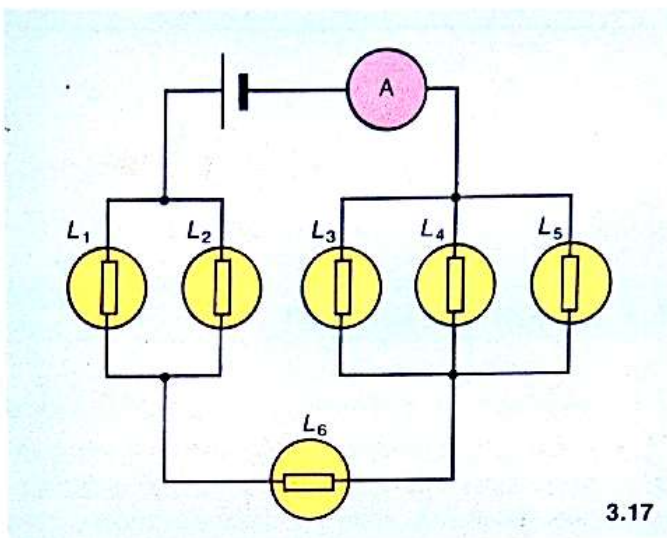
2/ Placer dans le circuit trois ampèremètres qui permettraient de mesurer les trois intensités données dans le texte.

3.16 Dans le montage ci-dessous, l'ampèremètre indique 0,75 A. Les trois lampes L_1 , L_2 et L_3 sont identiques. Simplifier le schéma et calculer l'intensité dans chaque lampe (f et f' sont des fils de court-circuit).



3.16

3.17 Dans le montage ci-dessous, les lampes utilisées sont toutes identiques. L'ampèremètre indique 0,3 A.

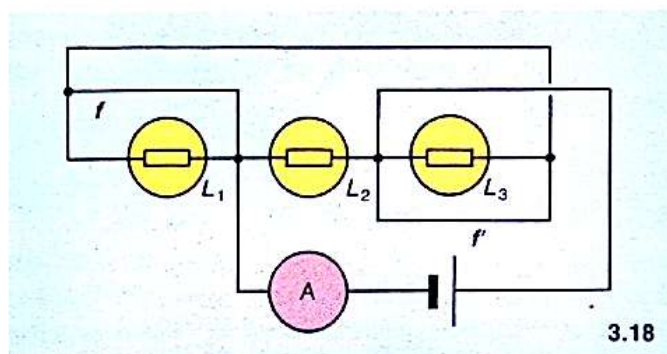


3.17

1/ Préciser la borne d'entrée du courant dans l'ampèremètre et le sens des courants dans chaque lampe.

2/ Quelle est l'intensité dans chaque lampe?

3.18 Dans le montage ci-dessous, l'ampèremètre indique 0,3 A. Les trois lampes L_1 , L_2 et L_3 sont identiques. Calculer l'intensité dans chaque lampe (f et f' sont des fils de court-circuit).



3.18

3.19 Pour vérifier la loi des nœuds, on mesure l'intensité I_1 d'un courant principal et les intensités I_2 et I_3 des courants dérivés. On trouve $I_1 = 83$ mA, $I_2 = 51$ mA et $I_3 = 34$ mA. L'ampèremètre, de classe 1,5, comportant une graduation de 100 divisions, est utilisé sur le calibre 0,1 A. Compte tenu des incertitudes, peut-on considérer que la loi des nœuds est vérifiée?

3.20 Un abonné à l'E.D.F. a souscrit pour son studio un contrat « Ménage » : l'intensité qui arrive dans les fils au compteur ne doit pas dépasser 15 A, sinon le disjoncteur coupe le courant. Dans le studio, les appareils suivants sont tous branchés en dérivation aux bornes du compteur (on indique entre parenthèses la valeur de l'intensité de fonctionnement ou intensité nominale) : six lampes (0,3 A); un radiateur (9,1 A); un four (6,8 A); une chaîne Hi-Fi (0,4 A), un poste de télévision (0,8 A).

1/ Tous les appareils peuvent-ils fonctionner en même temps?

2/ Quelles précautions doit prendre l'abonné?

Tension

4.1 notion de tension

4.1.1 tension et différence d'état électrique

Dans le tube de Crookes relié à une machine électrostatique « haute tension », nous avons provoqué *artificiellement* une dissymétrie entre les deux électrodes : l'une se charge négativement, l'autre positivement. Cette séparation ne « convient pas » aux porteurs de charge qui, *naturellement*, auront tendance à se rejoindre pour reformer un ensemble électriquement neutre.

Cette *dissymétrie* est à l'origine de ce que nous avons appelé tension entre les deux électrodes.

- La tension caractérise une dissymétrie électrique entre deux conducteurs.

De même il existe une tension entre les deux bornes d'une pile. Cette tension est liée, comme nous le verrons (chapitre 7), à la dissymétrie de la chaîne conductrice dans une pile.

4.1.2 tension et courant

Si les deux électrodes du tube de Crookes sont soumises à une tension suffisante, nous observons un faisceau d'électrons issu de l'électrode reliée à la borne négative du générateur.

- L'existence d'une tension entre deux conducteurs peut provoquer un déplacement de porteurs de charge de l'un vers l'autre.

Par l'intermédiaire de fils conducteurs, relierons les bornes d'une pile aux bornes d'une lampe. La tension que la pile maintient entre ses bornes est transmise aux bornes de la lampe qui est alors traversée par un courant.

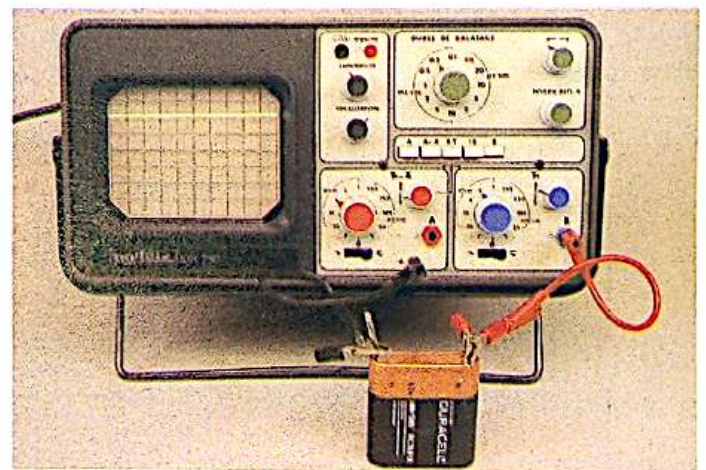
- Un courant ne peut traverser un dipôle que s'il existe une tension entre ses bornes.

Par contre l'existence d'une tension entre les bornes d'un dipôle ne provoque pas nécessairement le passage d'un courant; le dipôle se comporte alors comme un isolant. Ainsi lorsqu'on maintient une tension entre les plaques d'un oscillographe (voir document) aucun courant ne va d'une plaque vers l'autre : le vide très poussé qui les sépare est un isolant.

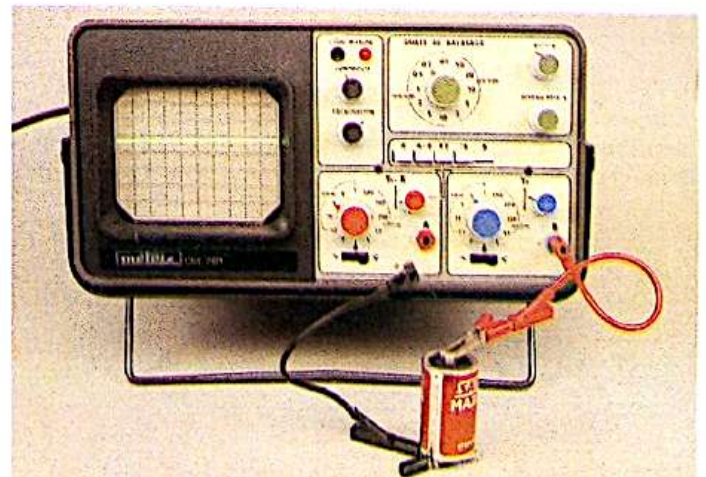
4.2 mesure d'une tension à l'oscillographe

4.2.1 expérience

Aux plaques (Y, Y') (respectivement entrée B et entrée *masse* de l'oscillographe), branchons successivement une pile 4,5 V puis une pile 1,5 V. Nous observons, pour un même réglage de l'appareil (fig. 1) que la déviation de la ligne lumineuse (trace du spot) est trois fois plus importante avec la première pile qu'avec la deuxième.



1 a. L'entrée B correspond à la plaque horizontale Y , l'entrée « masse » à la plaque Y' . La tension appliquée entre Y et Y' provoque une déviation verticale $d = 2,2$ cm. La sensibilité (bouton bleu) est réglée sur $k = 2$ V/cm. La tension appliquée vaut donc $u = k \cdot d = 4,4$ V.



1 b. Ici, la tension appliquée vaut 1,5 V.

Nous pouvons recommencer l'expérience avec d'autres piles. Nous constatons que le déplacement d du spot et la tension appliquée U sont proportionnels :

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{d_1}{d_2}$$

L'oscillographe permet de *comparer* deux tensions. Pour attribuer une valeur à une tension, il suffit de la comparer à une tension choisie comme unité. On effectue de la sorte une mesure.

- L'unité de tension est le volt (symbole : V).

On utilise couramment :

- le microvolt : $1 \mu\text{V} = 10^{-6} \text{ V}$,
- le millivolt : $1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V}$,
- le kilovolt : $1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}$.

Les oscillographes sont étalonnés et possèdent différentes sensibilités (voir document) exprimées en volts par centimètre (symbole : V/cm). On a :

$$U = k \cdot d$$

$\begin{matrix} U & = & k & \cdot & d \\ \text{V} & & \text{V/cm} & & \text{cm} \end{matrix}$

4.2.2 la tension, grandeur algébrique

L'oscillographe mesure la tension transmise(*) à ses plaques Y et Y' et appliquée entre l'entrée A (ou B) et la masse M de l'appareil.

- Dans le montage *a* de la figure 2 nous avons réalisé les branchements $P \rightarrow A$ et $N \rightarrow$ masse M .

Par convention, l'oscillographe mesure la tension

$$u_{AM} = u_{PN}$$

appliquée entre l'entrée A et la masse M .

- Dans le montage *b* de la figure 2 nous avons réalisé les branchements $N \rightarrow A$ et $P \rightarrow$ masse M .

Par convention, l'oscillographe mesure la tension

$$u_{AM} = u_{NP}$$

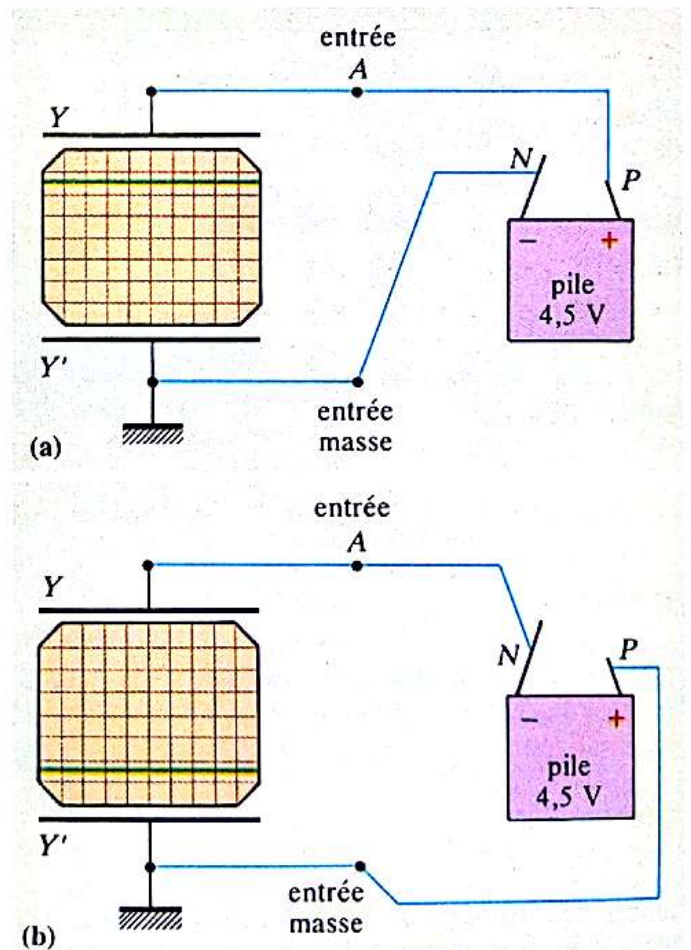
La tension u_{NP} provoque un déplacement du spot opposé à celui que provoque la tension u_{PN} . Nous pouvons donc considérer que les tensions u_{NP} et u_{PN} sont opposées et écrire :

$$u_{PN} = -u_{NP}$$

- La tension est une grandeur de nature algébrique.

Nous attribuons une valeur algébrique positive à la tension u_{PN} qui provoque un déplacement du spot vers le haut; par convention $u_{PN} > 0$; $u_{PN} = +4,5 \text{ V}$. P est la borne positive, N la borne négative. La mesure algébrique de la tension u_{NP} est négative; $u_{NP} = -4,5 \text{ V}$.

(*) Après amplification.



2. Les tensions appliquées aux plaques Y et Y' en (a) et en (b) sont opposées; les déplacements du spot sont opposés.

$$u_{PN} = -u_{NP}$$

Plus généralement, pour mesurer la tension u_{CD} aux bornes d'un dipôle (C, D), on réalise le branchement :

C → entrée A (ou B)
D → entrée masse M

- si le spot dévie vers le haut, alors $u_{CD} > 0$;
- si le spot dévie vers le bas, alors $u_{CD} < 0$.

La mesure du déplacement d du spot et la connaissance du coefficient k (en V/vm) permettent de déterminer la valeur absolue de la tension :

$$|u_{CD}| = k \cdot d.$$

Le sens du déplacement détermine le signe.

- Un oscillographe permet de mesurer la valeur algébrique de la tension entre les deux bornes d'un élément d'un circuit.

Remarque : On convient parfois de schématiser une tension en utilisant une flèche convenablement orientée. La flèche

C ← D

pointée vers C représente ainsi la tension u_{CD} (fig. 3).

4.3 mesure d'une tension avec un voltmètre

Une tension entre deux points se mesure couramment avec un voltmètre ou avec un multimètre utilisé en voltmètre (voir fiche technique).

La déviation d de l'aiguille est proportionnelle à la valeur absolue U de la tension transmise aux bornes de l'appareil :

$$U = k \cdot d.$$

Le facteur de proportionnalité k (V/div) dépend du nombre total D de divisions de la graduation et du calibre utilisé :

$$k = \frac{\text{calibre}}{D} \cdot \text{V}$$

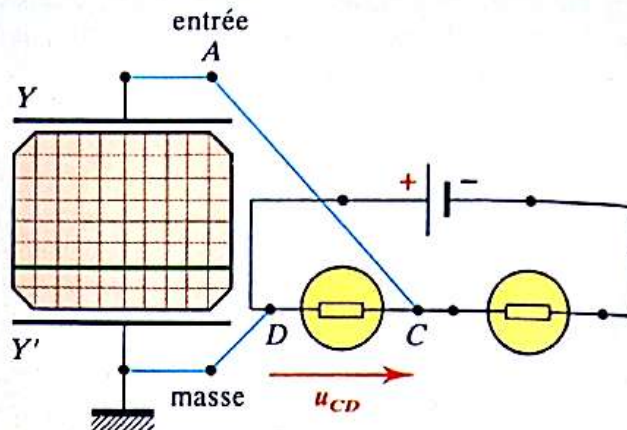
V/div
div

On peut estimer la précision d'une mesure de tension. Pour les appareils à aiguille, le constructeur indique la classe du voltmètre qui permet de calculer l'incertitude ΔU sur la mesure :

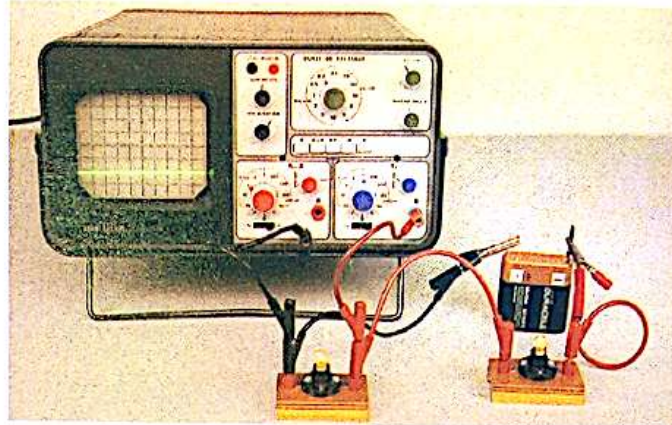
$$\Delta U = \frac{\text{classe} \times \text{calibre utilisé}}{100}$$

Comme nous l'avons déjà expliqué à propos de la mesure des intensités, la précision de la mesure est donnée par le quotient $\Delta U/U$ appelé encore *taux d'incertitude*.

Cela nécessite de limiter le nombre de chiffres significatifs du résultat.



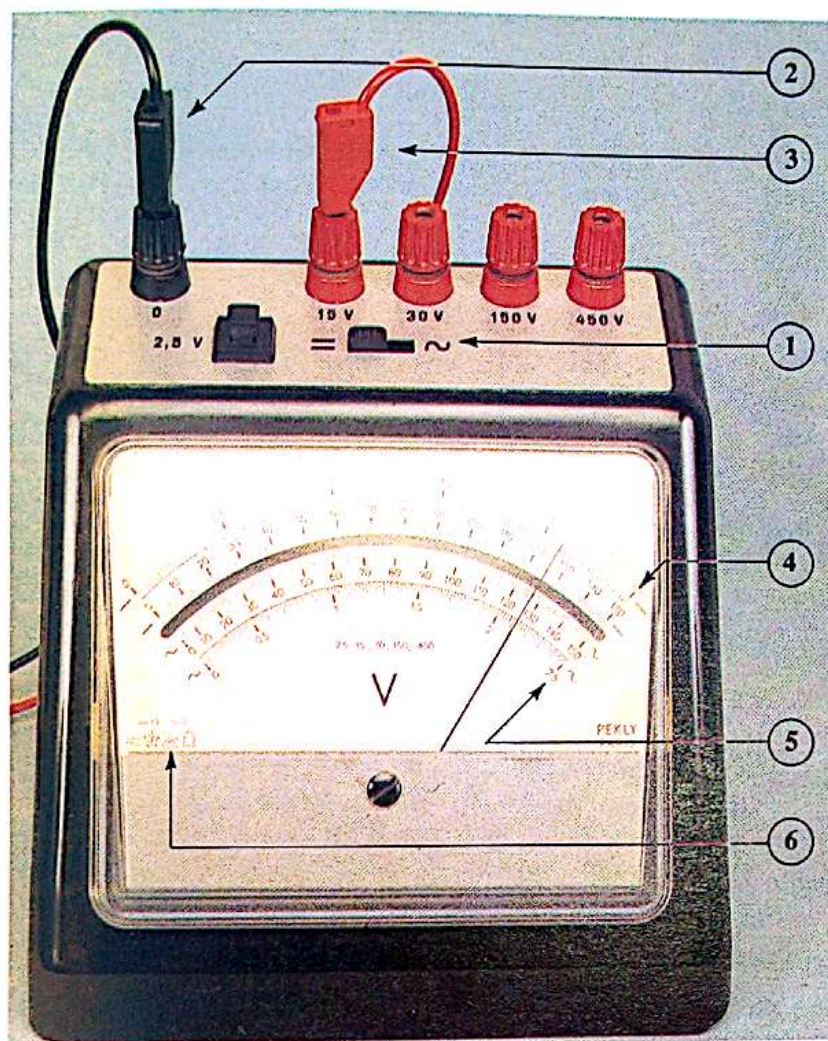
3a. Au branchement (C, D) ← (Y, Y') correspond une déviation vers le bas; donc $u_{CD} < 0$.



3b. La sensibilité de l'oscilloscope a été réglée sur 1 V/cm. On lit donc $u_{CD} = -2$ V.

Fiche technique

voltmètre à aiguille



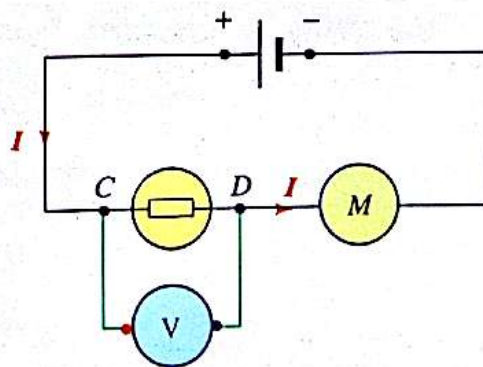
- ① Commutateur continu (=) ou alternatif (~)
- ② borne branchée à la borne du dipôle par où sort le courant
- ③ borne branchée à la borne du dipôle par où entre le courant
- ④ graduation pour les mesures des tensions continues
- ⑤ graduation pour les mesures des tensions efficaces en courant alternatif sinusoïdal
- ⑥ classe de l'appareil

Pour effectuer la mesure d'une tension en courant continu entre deux points C et D d'un circuit (fig. 4), effectuer les opérations suivantes :

- Choisir le mode continu : commutateur ① sur =.
- Brancher le voltmètre en dérivation aux bornes du dipôle (C , D).
Le calibre donne la tension maximale à ne pas dépasser. Si on ne connaît pas l'ordre de grandeur de la tension à mesurer, choisir le calibre le plus élevé. Cela fait :

- repérer le sens du courant dans le dipôle (de C vers D dans notre exemple);
- brancher la borne ② à la borne de sortie du courant (D);
- brancher la borne ③ à la borne d'entrée du courant (C).

- Choisir le calibre le mieux adapté.
Le calibre le mieux adapté est celui qui provoque la plus grande déviation de l'aiguille. La mesure ainsi faite est la plus précise.

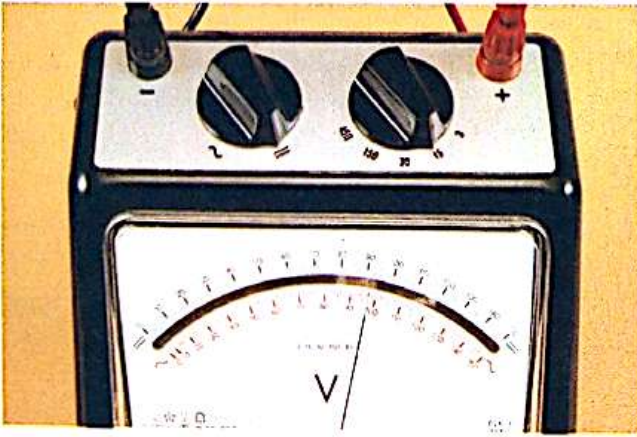


4. Mesure d'une tension entre deux points d'un circuit.

- Lire la déviation de l'aiguille sur une des deux graduations ④ et mesurer la tension u_{CD} .
- Calculer la précision de la mesure. Le constructeur indique la classe ⑥, pour un appareil à aiguille.
Voir en fin de chapitre, à titre de document, le mode d'emploi d'un multimètre à aiguille et d'un multimètre numérique.

Application 1 :

Quelle est la tension indiquée par le voltmètre de la photographie ci-dessous? Évaluer l'incertitude de la mesure.



Le calibre utilisé est 15 V. La lecture doit être faite sur la graduation noire comportant 150 divisions. L'objectif de l'appareil photographique peut être considéré comme l'œil de l'observateur qui lit 92 divisions. Cependant

l'image de l'aiguille donnée par le miroir n'est pas masquée par l'aiguille elle-même; il y a une erreur de lecture (erreur de parallaxe) : l'aiguille est en fait entre 91 et 92 divisions. Nous adoptons donc $\approx 91,5$ div et

$$U = \frac{15}{150} \times 91,5 = 9,15 \text{ V.}$$

Le constructeur indique une classe de 1,5 en continu. L'incertitude est donc :

$$\Delta U = \frac{1,5}{100} \times 15 = 0,225 \text{ V} \approx 0,23 \text{ V.}$$

Le taux d'incertitude vaut :

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{0,23}{9,15} \approx 0,02, \text{ soit } 2\%.$$

Remarquons que l'erreur de lecture, soit une demi-division, correspond à une tension en excès de +0,05 V. Il ne faut pas confondre l'erreur de lecture (parfaitement évitable), de valeur connue (en particulier son signe), avec l'incertitude due à l'imprécision de l'appareil. De celle-ci, imposée par le constructeur même de l'appareil, on estime seulement la valeur absolue.

4.4 quelques ordres de grandeur de tension

Par temps orageux apparaissent entre les nuages et la Terre des tensions de l'ordre de 10 millions de volts.

Les accélérateurs de particules utilisent des tensions de plusieurs millions de volts.

Quelques dizaines de milliers de volts existent entre les deux électrodes d'un tube de Crookes en fonctionnement.

Les lignes à haute tension qui transportent l'énergie électrique sont formées de trois câbles. Pour certaines grandes lignes, entre deux d'entre eux existe une tension maximale de l'ordre de 540 kilovolts.

Entre la phase et le neutre d'une installation domestique existe une tension maximale de l'ordre de 310 volts.

Une lampe de poche nécessite une tension d'environ 3,5 volts.

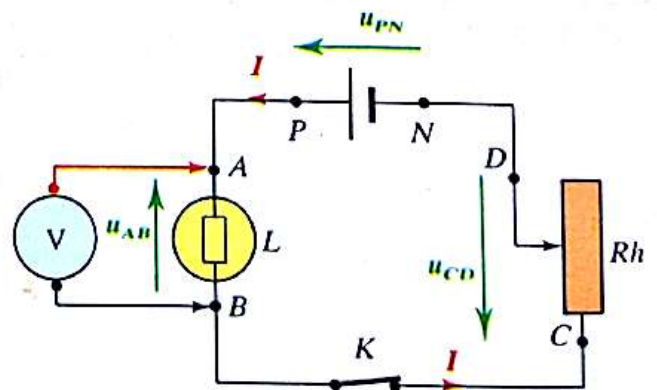
Des tensions de quelques microvolts apparaissent au contact de certaines cellules vivantes.

4.5 additivité des tensions

Le circuit série de la figure 5 comporte un rhéostat (C, D) permettant de régler l'intensité du courant. Mesurons à l'aide d'un voltmètre les tensions u_{PN} , u_{AB} et u_{CD} .

Quelle que soit l'intensité du courant, l'étude expérimentale ci-contre montre que :

$$u_{PN} = u_{AB} + u_{CD}.$$



5. Le voltmètre est branché ici en dérivation aux bornes A et B de la lampe. Il mesure la tension u_{AB} . Si l'on mesure également u_{CD} et u_{PN} , on constate que :

$$u_{PN} = u_{AB} + u_{CD}.$$

La tension qu'un générateur maintient entre ses bornes se répartit aux bornes des différents dipôles d'un circuit série dans lequel il est inséré.

En fait, les tensions entre les extrémités des différents fils de jonction sont pratiquement nulles. En toute rigueur :

$$u_{PN} = u_{PA} + u_{AB} + u_{BC} + u_{CD} + u_{DN},$$

relation qui rappelle la relation de Chasles.

Avec $u_{PA} \approx u_{BC} \approx u_{DN} \approx 0$, cette relation se réduit effectivement à $u_{PN} = u_{AB} + u_{CD}$.

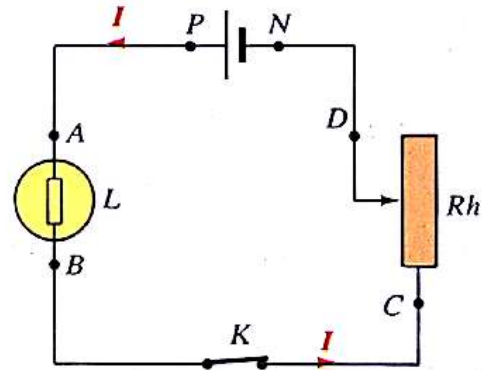
Remarque : Lorsque nous branchons le voltmètre aux bornes d'une lampe, par exemple, nous modifions le circuit en proposant au courant une dérivation : celle du voltmètre. L'intensité du courant dans le circuit et les tensions aux bornes des différents dipôles peuvent s'en trouver modifiées. En fait un bon voltmètre ne doit être traversé que par un courant infime ; l'intensité du courant mesurée par l'ampèremètre n'est alors que très peu modifiée lorsqu'on branche le voltmètre en dérivation aux bornes de la lampe.

Application 2 :

Pour un autre réglage du rhéostat de la figure 5, on relève les mesures suivantes : $u_{PD} = 4,5 \text{ V}$; $u_{NB} = -2 \text{ V}$. Calculer u_{PN} , u_{AB} et u_{CD} .

Nous avons $u_{AP} \approx u_{BC} \approx u_{DN} \approx 0$
(fils de connexion).

- $u_{PN} = u_{PD} + u_{DN}$; or $u_{DN} \approx 0$, d'où :
 $u_{PN} = u_{PD} = 4,5 \text{ V}$.
- $u_{AB} = u_{AP} + u_{PN} + u_{NB}$; or $u_{AP} \approx 0$, d'où :
 $u_{AB} = u_{PN} + u_{NB} = 4,5 - 2 = 2,5 \text{ V}$.
- $u_{CD} = u_{CB} + u_{BA} + u_{AP} + u_{PN} + u_{ND}$
or $u_{CB} \approx u_{AP} \approx u_{ND} \approx 0$
et $u_{BA} = -u_{AB} = -2,5 \text{ V}$
donc $u_{CD} = -2,5 + 4,5 = 2 \text{ V}$.



Fiche expérimentale

additivité des tensions

Mesurons successivement les tensions aux bornes des différents dipôles du circuit série de la figure 5 et regroupons nos résultats (en volts) dans un tableau, cela pour deux positions du rhéostat.

u_{PN}	u_{AB}	u_{CD}	$u_{AB} + u_{CD}$
4,37	0,63	3,70	4,33
4,20	3,00	1,27	4,27

Branchons le voltmètre aux extrémités d'un fil de jonction : même sur la plus grande sensibilité, l'aiguille du voltmètre ne dévie pas. La tension que nécessite le passage d'un courant dans un fil de jonction, excellent conducteur, est trop faible pour être mesurée avec un voltmètre ordinaire. Nous la considérons nulle : $u_{PA} \approx u_{BC} \approx u_{DN} \approx 0$.

Nous devons vérifier que : $u_{PN} \approx u_{AB} + u_{CD}$.

Évaluons les incertitudes sur ces différentes tensions.

La classe de l'appareil est 1,5.

- Sur le calibre 5 V :

$$\Delta u_{CD} = \Delta u_{PN} = \frac{1,5 \times 5}{100} = 0,075 \text{ V} \approx 0,08 \text{ V}.$$

- Sur le calibre 2,5 V :

$$\Delta u_{AB} = \frac{1,5 \times 2,5}{100} = 0,0375 \text{ V} \approx 0,04 \text{ V}.$$

L'incertitude sur la somme $u_{AB} + u_{CD}$ est égale à la somme des incertitudes sur u_{AB} et u_{CD} , soit :

$$\Delta u \approx 0,04 + 0,08 = 0,12 \text{ V}.$$

On constate que la loi d'additivité des tensions est satisfaite, car les valeurs

$$u_{PN} = 4,37 \text{ V} \quad \text{à } \pm 0,08 \text{ V près}$$

et

$$u_{AB} + u_{CD} = 4,33 \text{ V} \quad \text{à } \pm 0,12 \text{ V près}$$

sont compatibles.

4.6 notion de différence de potentiel

Soit 3 points A , B et C d'un circuit. Nous avons introduit expérimentalement deux propriétés fondamentales de la tension :

$$U_{AB} = -U_{BA}$$

$$U_{AB} = U_{AC} + U_{CB} \text{ (relation de Chasles).}$$

Ces propriétés suggèrent l'idée d'introduire l'écriture :

$$U_{AB} = V_A - V_B.$$

Vérifions que cette écriture est bien conforme aux propriétés précédentes :

- $U_{AB} = V_A - V_B = -(V_B - V_A) = -U_{BA}$.
- $U_{AB} = V_A - V_B = (V_A - V_C) + (V_C - V_B) = U_{AC} + U_{CB}$.

$V_A - V_B$ est appelée **différence de potentiel** entre les points A et B .

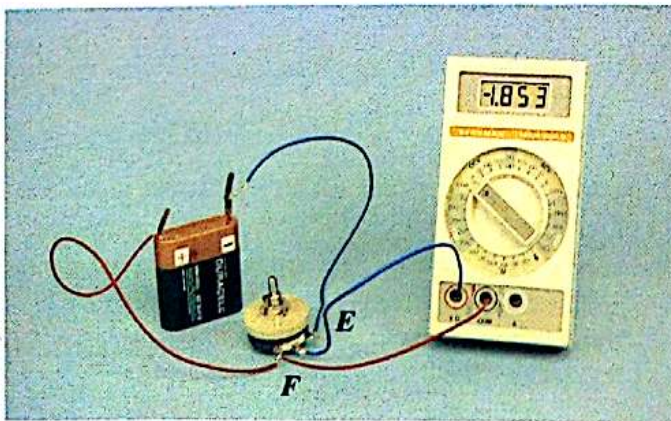
- On peut parler indifféremment de tension ou de différence de potentiel (d.d.p.) entre deux points.

Très souvent on considère la d.d.p. entre un point et un point de référence : la masse par exemple.

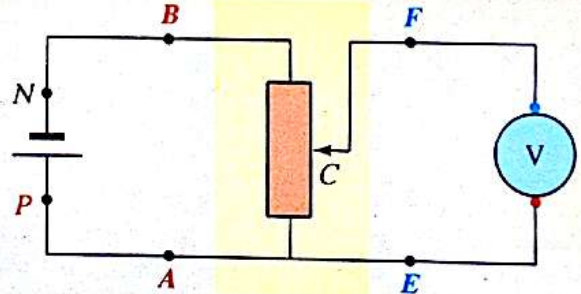
4.7 montage diviseur de tension

La photographie 6 représente un *montage diviseur de tension*, ou *potentiométrique*, schématisé sur la figure 7. Une pile est branchée à l'entrée (A , B) du potentiomètre. La tension U_{EF} de sortie peut être mesurée à l'aide d'un voltmètre. Un bouton de réglage permet de modifier la position du curseur; la tension U_{EF} varie alors entre une valeur nulle et une valeur maximale égale à la tension que la pile maintient entre ses bornes :

$$0 \leq U_{EF} \leq U_{PN}.$$



6. Montage d'un rhéostat en diviseur de tension (potentiomètre). Lorsqu'on tourne le bouton, la tension entre E et F varie. Quelle est la signification du signe $-$ qui apparaît sur l'écran d'affichage? Quelle est la tension U_{FE} ?



7. A et B constituent les bornes d'entrée du potentiomètre; E et F constituent les bornes de sortie. Si $U_{PN} = U_{AB} = 4,5 \text{ V}$, la tension U_{EF} varie, selon la position du curseur C , de 0 à $4,5 \text{ V}$. Le dipôle (E , F) constitue une source de tension réglable.

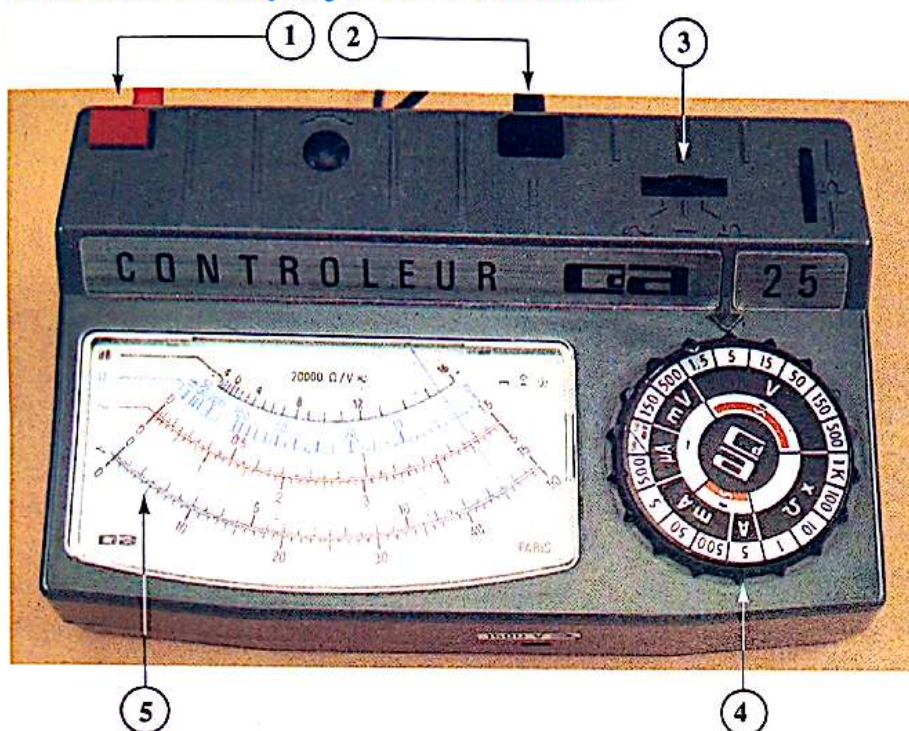
Nous réalisons ainsi un dipôle (E , F) qui maintient entre ses bornes une tension réglable. La figure 8 en représente le symbole simplifié. Ce montage permet de ne prendre qu'une partie de la tension totale U_{PN} .



8. Symbole d'une source de tension réglable.

DOCUMENT

Multimètre employé en voltmètre



- ① et ② bornes de branchement
- ③ sélecteur continu-alternatif
- ④ sélecteur de fonction et de calibres
- ⑤ graduation en continu

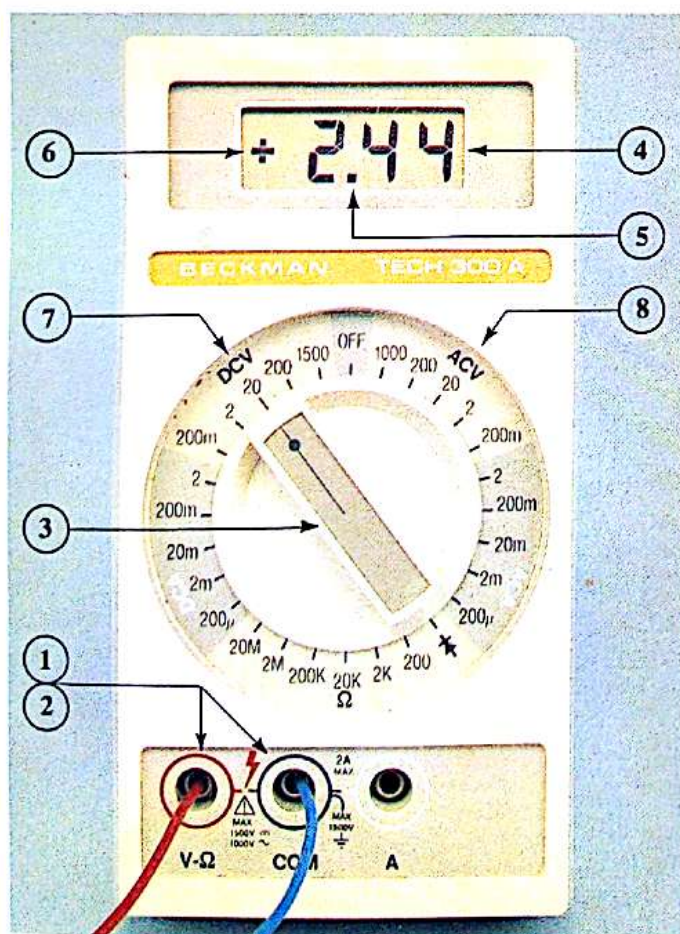
Exemple de mesure

- Calibre 5 V; $d = 45$ divisions; $u = 4,50$ V.
- Incertitude de lecture :
0,5 division \leftrightarrow 0,05 V.
- Classe de l'appareil : 1,5; incertitude due à l'appareil :

$$\Delta u = \frac{1,5 \times 5}{100} = 0,075 \text{ V} \approx 0,08 \text{ V.}$$

L'incertitude due à l'appareil est supérieure à celle due à la lecture.

Multimètre numérique employé en voltmètre



- ① et ② bornes de branchement
- ③ sélecteur de fonction et de calibre
- ④ affichage de la grandeur mesurée
- ⑤ point décimal
- ⑥ signe de la tension
- ⑦ calibres correspondant à une tension continue (DCV)
- ⑧ calibres correspondant à une tension efficace en alternatif (ACV)

Exemple de mesure

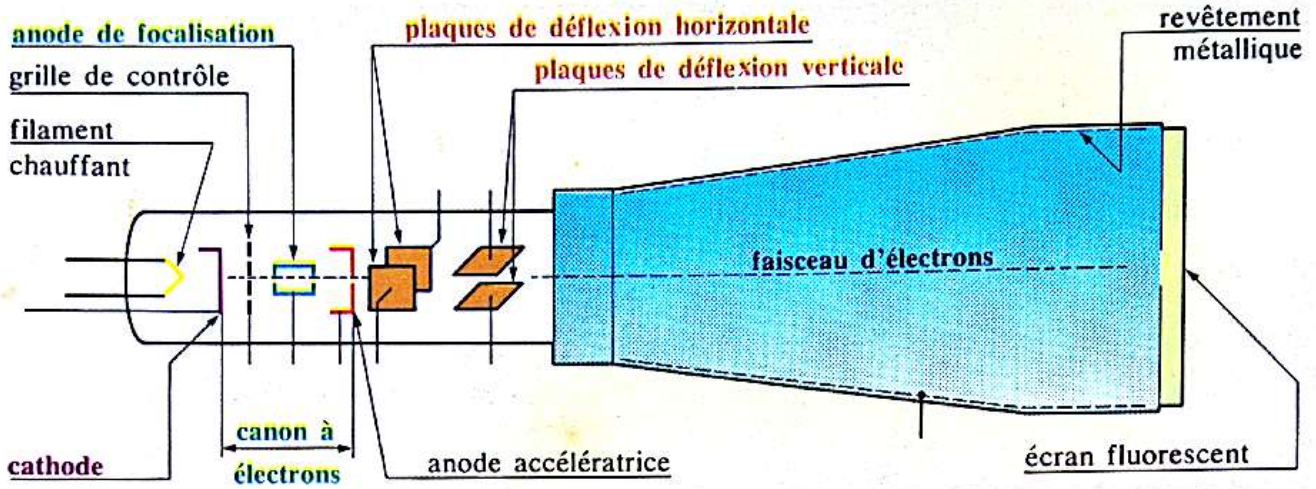
- Calibre DVC 20 : mesure d'une tension continue inférieure à 20 V entre deux points (C, D) d'un circuit.
- Branchement : C \rightarrow V et D \rightarrow COM.
- Mesure : directement affichée en volts avec un point décimal : 2.44 V.
- Signe : le signe + précise que la tension u_{CD} est positive; un signe - indiquerait que u_{CD} est négative.
- Précision : il y a une incertitude de ± 1 sur le dernier chiffre affiché (incertitude de 1 digit), soit ici $\pm 0,01$ V. En outre le fabricant donne comme incertitude 1 % sur la lecture, soit ici $\pm 0,0244$ V. $\Delta u = 0,01 + 0,0244 \approx 0,03$ V, d'où :

$$\frac{\Delta u}{u} = \frac{0,03}{2,44} \approx 1,4 \%$$

L'oscilloscope

La partie essentielle d'un oscilloscope est un tube de verre où l'on a fait un vide très poussé. Un canon à électrons y projette un faisceau d'électrons. Par excitation de la substance fluorescente de l'écran, ces particules provoquent l'apparition d'un spot

lumineux. De nombreux boutons permettent de régler l'intensité du faisceau, sa finesse, son centrage sur l'écran quadrillé, etc. Un faisceau intense et très fin peut détériorer la substance fluorescente de l'écran s'il la frappe toujours au même endroit.



9. Dans un oscilloscope, les électrons, émis par la cathode, sont accélérés et focalisés avant de passer entre les plaques de déflexion horizontale et verticale.

Dans le tube, deux paires de plaques, (X, X') et (Y, Y'), sont disposées — les premières verticalement, les secondes horizontalement — de part et d'autre du faisceau.

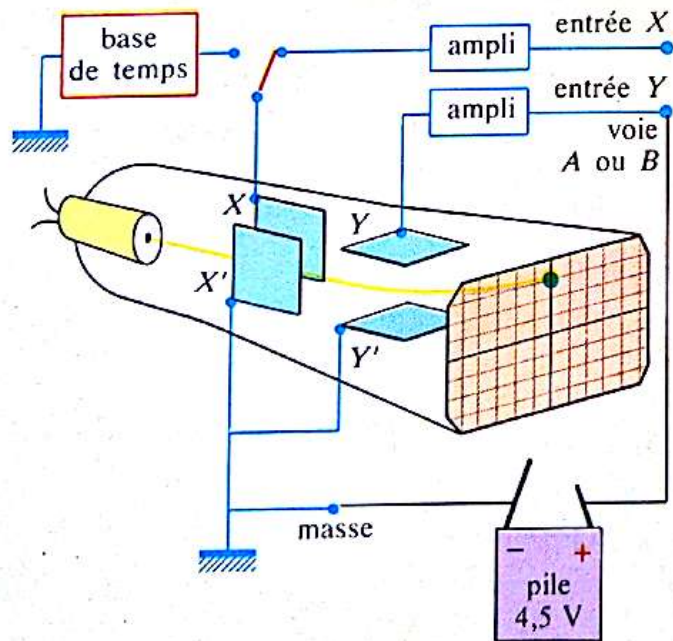
Les plaques Y' et X' sont reliées entre elles à l'intérieur de l'appareil, ainsi qu'à une borne extérieure appelée «masse» et repérée par \perp

La plaque X est reliée à une borne extérieure X (ou A) en passant par un système électronique amplificateur; il en est de même de la plaque Y reliée à une borne extérieure Y (ou B).

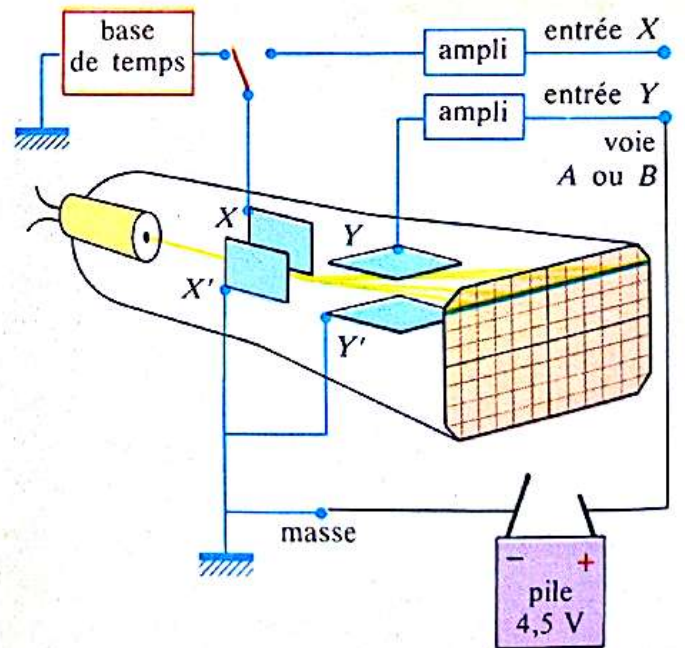
Grâce au dispositif électronique amplificateur, une source de tension, même très faible, branchée aux bornes (X, X') provoque une déviation horizontale du faisceau électronique, donc aussi du spot. Si la source de tension est branchée aux bornes (Y, Y'), la déviation observée est verticale (fig. 10).

Base de temps

Un oscilloscope possède un dispositif, appelé *base de temps*, qui peut être connecté aux plaques verticales (X, X') (fig. 11).



10. Une source de tension connectée aux plaques (Y, Y') provoque une déviation verticale (ici vers le haut) du faisceau, et donc du spot.



11. Lorsque le dispositif de balayage (base de temps) est connecté aux plaques (X, X') le spot traverse l'écran de gauche à droite.

Ce dispositif communique au spot un déplacement horizontal de la gauche vers la droite de l'écran. Lorsque le spot est parvenu à droite de l'écran, le dispositif provoque son brusque retour vers la gauche ainsi que son extinction pendant ce retour; puis le spot est à nouveau entraîné vers la droite... et ainsi de suite. Ce phénomène de *balayage* se reproduit ainsi à intervalles de temps T_b successifs égaux : c'est un phénomène périodique. La durée T_b est la *période* (voir chapitre 5) de *balayage*. Cette durée peut être réglée de quelques secondes à quelques microsecondes, selon les appareils.

Lorsque la durée de balayage est inférieure à 0,1 s, la persistance des impressions lumineuses permet d'observer un trait lumineux horizontal continu. Le balayage étant déclenché, le spot ne stationnant plus sur l'écran, on peut augmenter sa luminosité et sa finesse sans risque de détériorer la substance fluorescente de l'écran.

Un oscillographe utilisé avec balayage permet de suivre les variations de la tension appliquée aux plaques horizontales (Y, Y') en fonction du temps. Sur la figure 1 (p. 34), le spot reste au même niveau horizontal durant le balayage : la tension appliquée est continue (ou constante).

Réglage

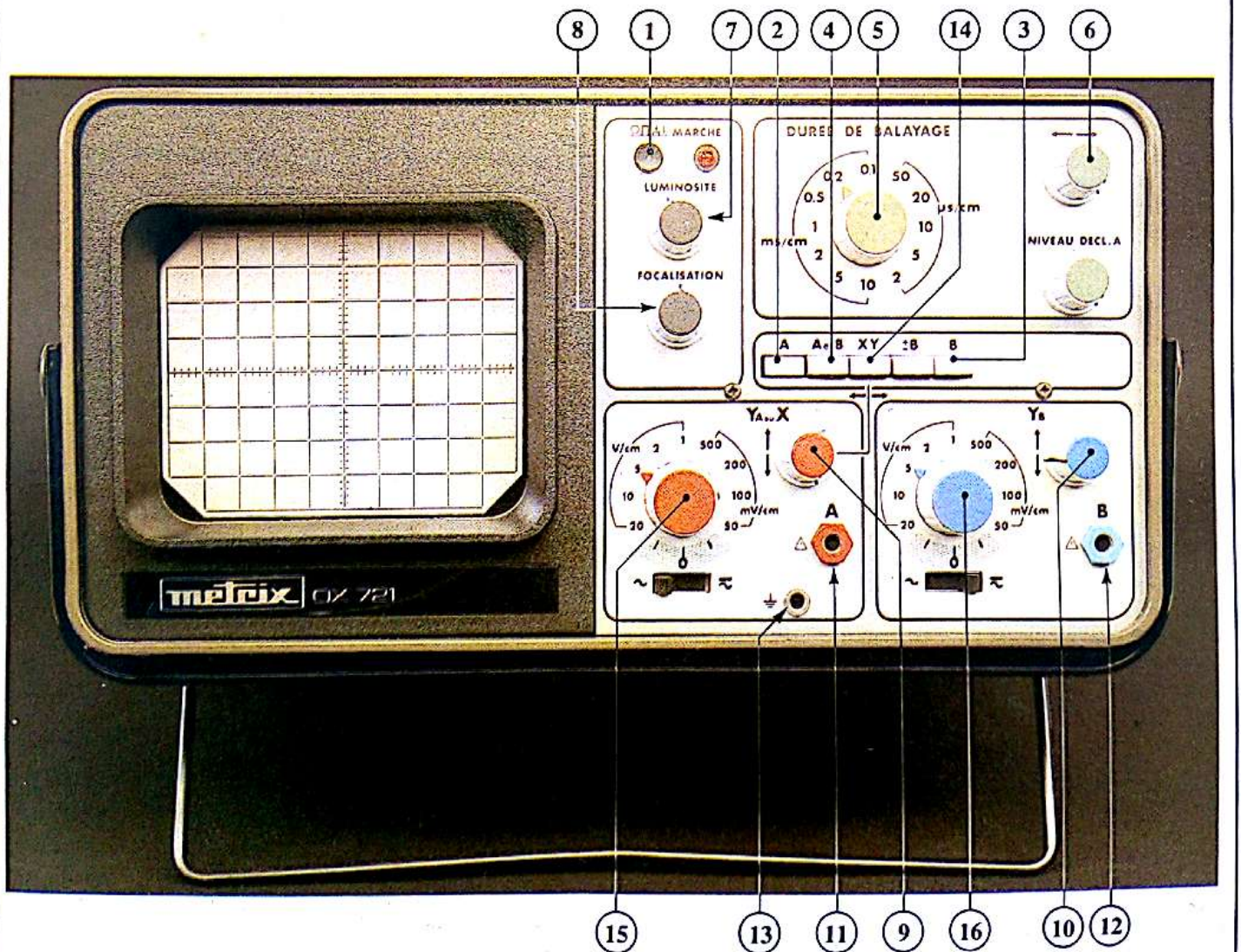
La photographie ci-dessous représente un oscillographe utilisé au lycée. Quelle que soit la marque de l'appareil, on retrouve les mêmes réglages; seules la forme et la place des boutons diffèrent.

Enclencher la touche **MARCHE-ARRÊT** (1). Une ligne lumineuse horizontale apparaît sur l'écran si la touche **A** (2) ou **B** (3) est enfoncée. Deux traits lumineux parallèles apparaissent en appuyant sur **A** et **B** (4); cet appareil permet en effet l'étude simultanée de deux tensions. La base de temps est alors automatiquement déclenchée. La **DURÉE DE BALAYAGE** (5) permet de régler la période de balayage de la base de temps. Le cadrage horizontal (6) déplace la ligne lumineuse horizontalement. Le bouton **LUMINOSITÉ** (7) règle la luminosité du spot. Le bouton **FOCALISATION** (8) agit sur sa finesse. Les boutons (9) et (10) déplacent verticalement les lignes lumineuses correspondant respectivement à l'entrée **A** (11) et à l'entrée **B** (12); ils permettent de centrer les traces sur l'écran. La borne masse (13) est reliée aux plaques X' et Y' et à la terre (\perp).

Lorsqu'on appuie sur le bouton **XY** (14), la ligne lumineuse est remplacée par un point lumineux (spot). La base de temps est supprimée : une tension peut alors être appliquée entre les plaques (X, X') par l'entrée **A** (déviation horizontale). L'entrée **B** est alors reliée à la plaque Y (déviation verticale).

Brancher un oscillographe, c'est appliquer une tension entre sa borne d'entrée **A** (ou **B**) et la masse. Les boutons de *gain* (15) ou (16) permettent de régler la sensibilité de l'oscillographe, exprimée en V/cm.

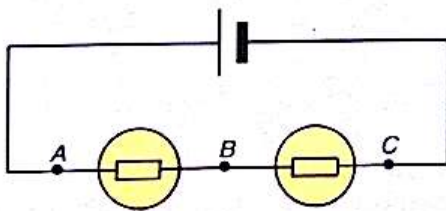
Sur la position **A** et **B** (4) deux tensions peuvent être visualisées simultanément : fonctionnement en « bicourbe ».



Faire le point

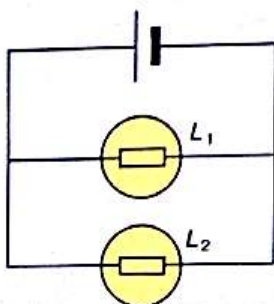
- Quelle est l'unité de tension électrique?
- Citer des dipôles qui maintiennent une tension électrique entre leurs bornes.
- Comment mesurer une tension électrique entre deux points d'un circuit ou aux deux bornes d'un dipôle?
- Qu'appelle-t-on classe d'un voltmètre à aiguille?
- Donner les précautions d'emploi pour l'utilisation d'un voltmètre lors de la mesure d'une tension continue.
- Qu'appelle-t-on loi d'additivité des tensions dans un circuit électrique?
- La tension est une grandeur algébrique. Un voltmètre permet-il de déterminer le signe de la tension entre deux points d'un circuit?
- Pour qu'un courant circule entre deux points d'un circuit, il faut qu'entre eux existe une tension. Or, dans un circuit série, la tension entre les extrémités d'un fil de jonction est pratiquement nulle. Peut-on dire que l'intensité dans ce fil est pratiquement nulle? Pourquoi?

4.1 Refaire le schéma ci-dessous et montrer comment doit être branché un voltmètre pour mesurer la tension u_{BC} . Indiquer sur le schéma le sens des courants. Préciser le signe de la tension u_{CB} .



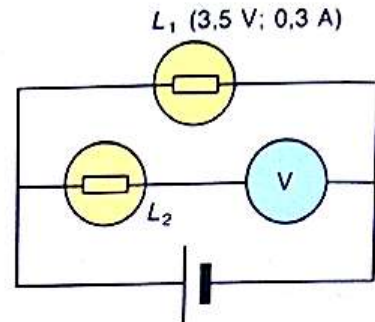
4.1

4.2 Refaire le schéma ci-dessous en plaçant le minimum d'appareils qui permettraient de mesurer les intensités dans chaque branche et les tensions aux bornes du générateur, de la lampe L_1 et de la lampe L_2 .



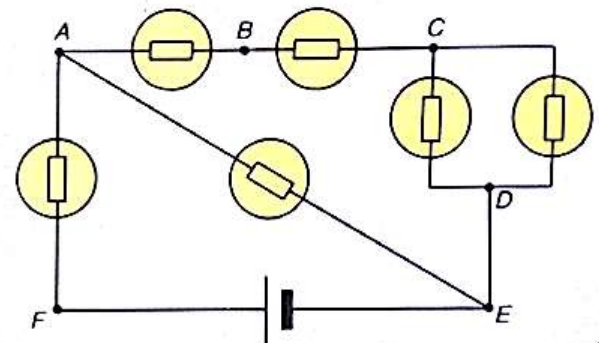
4.2

4.3 Un voltmètre est branché comme l'indique le schéma ci-dessous. La lampe L_1 fonctionne normalement. La lampe L_2 , identique à la lampe L_1 , s'allume-t-elle? L'indication donnée par le voltmètre a-t-elle un sens? Quelle tension mesure-t-il approximativement?



4.3

4.4 Dans le montage ci-dessous, indiquer le sens du courant dans chaque branche. Quels sont les signes des tensions suivantes : u_{FE} , u_{AF} , u_{AB} , u_{CB} , u_{DE} , u_{CD} , u_{AE} ?

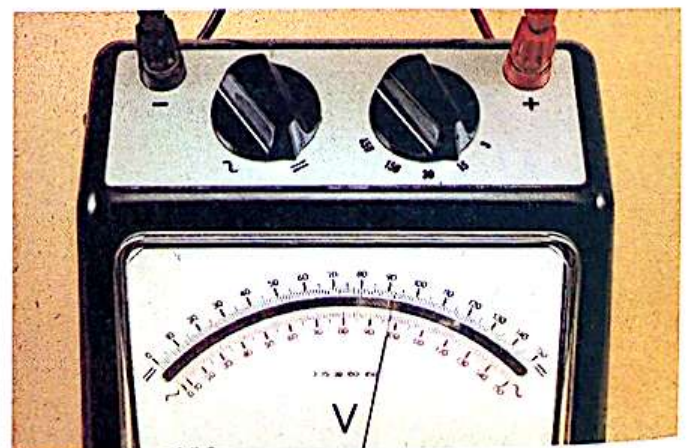


4.4

Mesure d'une tension à l'aide d'un voltmètre

4.5 Un voltmètre mesure une tension entre deux points d'un circuit. Le cadran comporte 150 divisions et le calibre utilisé est 3 V. L'aiguille s'immobilise en face de la graduation 128. Quelle est la tension mesurée?

4.6 La photographie représente un voltmètre lors d'une mesure de tension.

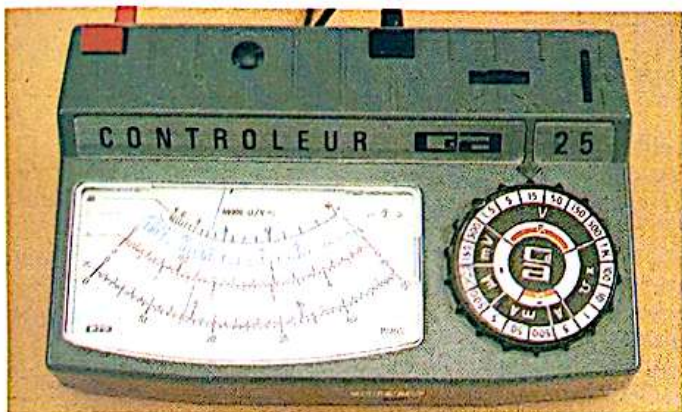


- 1/ Comment peut-on s'assurer qu'il mesure une tension continue? Quel est le calibre utilisé?
- 2/ L'aiguille est sur la graduation 92. Quelle est la valeur de la tension mesurée?
- 3/ Pourrait-on utiliser le calibre 3 V?

4.7 On mesure une tension à l'aide d'un voltmètre dont le cadran comporte 150 divisions. Cet appareil possède les calibres 3 V, 5 V et 15 V. Sur le calibre 5 V, l'aiguille s'arrête sur la graduation 80.

- 1/ Quel est le résultat de cette mesure?
- 2/ Quel est le calibre le mieux adapté à cette mesure?

4.8 Le multimètre ci-dessous est utilisé comme voltmètre pour mesurer une tension continue.



- 1/ Quel est le calibre utilisé?
- 2/ Sur quelle graduation doit-on lire la déviation de l'aiguille?
- 3/ Déterminer la valeur de la tension mesurée.
- 4/ Le calibre utilisé est-il le mieux adapté?
- 5/ Sur quelle graduation s'arrêterait théoriquement l'aiguille si l'on employait le calibre le mieux adapté?

Incertitude et précision d'une mesure

4.9 Un voltmètre de calibre 5 V et de classe 2 comporte un cadran de 100 divisions. On a effectué une série de mesures portées dans le tableau suivant. Compléter le tableau et calculer, compte tenu de la classe de l'appareil, l'incertitude et le taux d'incertitude des mesures. Conclure.

div.	15	55	95
U (V)			
ΔU (V)			
$\Delta U/U$ (%)			

4.10 Déterminer l'incertitude et le taux d'incertitude des mesures effectuées avec le voltmètre et le multimètre des exercices 4.7 et 4.8. La classe de précision des deux appareils est 1,5. Conclure.

4.11 Le voltmètre de la photographie ci-dessous mesure la tension aux bornes d'un dipôle. Répondre aux questions suivantes et justifier votre réponse.



- 1/ Mesure-t-il une tension continue?
- 2/ Quel est le calibre utilisé?
- 3/ L'aiguille est arrêtée sur la graduation 36. Quelle est la tension mesurée?
- 4/ La classe de l'appareil est de 1,5. Calculer le taux d'incertitude de la mesure.

4.12 Un voltmètre possède une seule échelle de graduations de 0 à 150. Le constructeur déclare qu'à chaque lecture, on réalise une erreur sur la mesure de la tension de 1 division par défaut ou par excès. Sur le calibre 30 mV, la mesure d'une tension correspond à une déviation de l'aiguille de 120 divisions. Sur le calibre 75 mV, la même mesure donne une déviation de 47 divisions.

- 1/ En supposant que l'appareil ne perturbe pas la mesure, déterminer dans chaque cas l'incertitude sur la mesure de la tension.
- 2/ Les résultats sont-ils compatibles? Quelle est selon vous la meilleure mesure?

4.13 Un multimètre numérique est employé pour mesurer une tension continue. Il possède les calibres 2 V, 20 V, 200 V.

- 1/ Lors d'une mesure, on utilise le calibre 20 V. Il affiche le nombre 8.74. Quelle est la tension mesurée?
- 2/ Le constructeur donne comme incertitude 0,75 % de la lecture plus 3 sur le dernier chiffre affiché (3 « digits »), soit ici 0,03 volt. Calculer l'incertitude sur la mesure de la tension et le taux d'incertitude.
- 3/ Sur le calibre 200 V, il affiche le nombre 8.7. Calculer le taux d'incertitude sur la mesure, sachant que l'incertitude est toujours égale à 0,75 % de la mesure plus 3 « digits ». Comparer aux résultats précédents.

TENSION

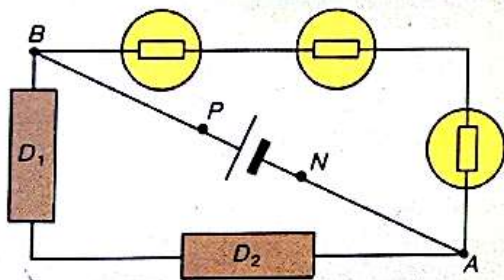
Loi d'additivité des tensions

4.14 Entre trois points d'un circuit A, B, C, on a mesuré les tensions $u_{AB} = 6 \text{ V}$ et $u_{CA} = 8 \text{ V}$. Quelle est la tension u_{BC} ?

4.15 Les mesures des tensions entre différents points d'un circuit ont donné les résultats : $u_{AC} = 4 \text{ V}$; $u_{DB} = -6 \text{ V}$; $u_{AE} = 12 \text{ V}$; $u_{DA} = -10 \text{ V}$. Calculer u_{AB} , u_{DE} , u_{BC} . Modifie-t-on le réseau si on relie B et C par un fil conducteur?

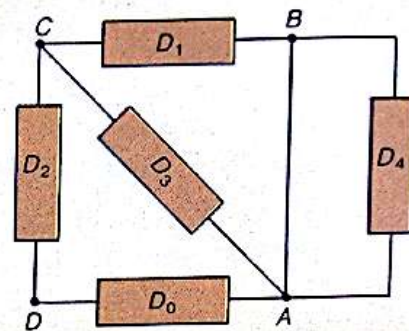
4.16 On possède trois accumulateurs. Les tensions mesurées aux bornes de chacun d'entre eux lorsqu'ils ne débitent pas sont respectivement 4,5 V, 1,5 V et 1,5 V. Indiquer comment il est possible de les associer en série par deux ou par trois pour obtenir des dipôles de bornes A et B dont la tension u_{AB} serait 3 V, 6 V ou 7,5 V.

4.17 Dans le montage ci-dessous, les lampes sont identiques, ainsi que les deux dipôles D_1 et D_2 . Chaque lampe fonctionne normalement sous une tension de 3,5 V. Quelle est la tension u_{PN} aux bornes du générateur? Quelle est la tension aux bornes de chacun des dipôles D_1 et D_2 ?



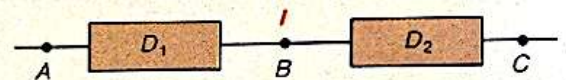
4.17

4.19 Le montage ci-dessous est constitué de dipôles récepteurs ou générateurs. On donne les tensions $u_{BC} = 3 \text{ V}$ et $u_{CD} = -6 \text{ V}$. Calculer les tensions u_{BA} , u_{AC} et u_{DA} . Le dipôle D_4 est une lampe; peut-elle fonctionner?



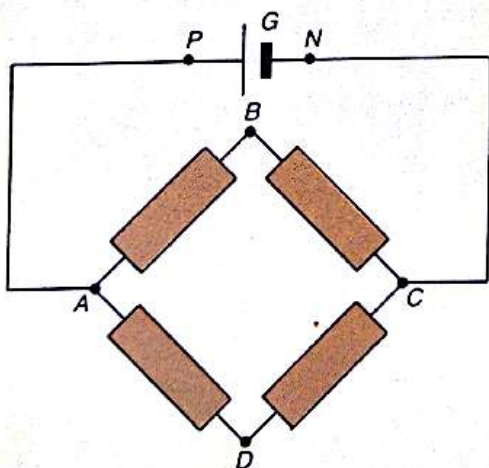
4.19

4.20 Pour vérifier la loi d'additivité des tensions, on mesure les tensions u_{AB} , u_{BC} et u_{AC} à l'aide d'un voltmètre de classe 2 comportant une graduation de 150 divisions et utilisé sur le calibre 15 V. On a trouvé : $u_{AC} = 134 \text{ div}$; $u_{AB} = 78 \text{ div}$; $u_{BC} = 54 \text{ div}$. Calculer les tensions correspondantes. Peut-on considérer, compte tenu des incertitudes, que la loi d'additivité des tensions est vérifiée?



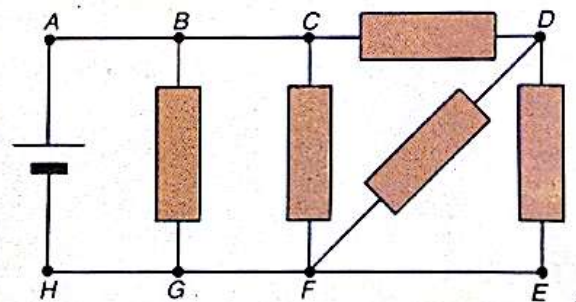
4.20

4.18 G est une alimentation stabilisée; la tension u_{PN} à ses bornes est constante quelle que soit l'intensité débitée. Cette tension est réglée sur la valeur 24 V.



4.18

4.21 On considère le montage ci-dessous. On mesure : $u_{BG} = 10 \text{ V}$ et $u_{CD} = 4 \text{ V}$. La chute de tension provoquée par les fils de connexion est quasiment nulle.



4.21

1/ Quelle est la tension aux bornes de chacun des dipôles s'ils sont tous identiques?

2/ On met en court-circuit les bornes B et D à l'aide d'un fil parfaitement conducteur. Quelle est la tension aux bornes de chacun des dipôles?

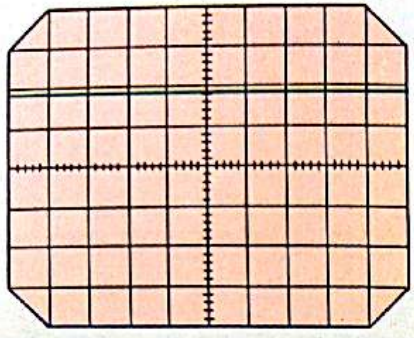
1/ Calculer u_{CF} , u_{FD} et u_{DE} .

2/ Indiquer les nœuds et les branches du circuit, le sens du courant dans chaque branche si, seul, le dipôle (A, H) est générateur.

3/ Représenter par des flèches les tensions u_{CF} , u_{FD} et u_{DE} .

Utilisation d'un oscillographe

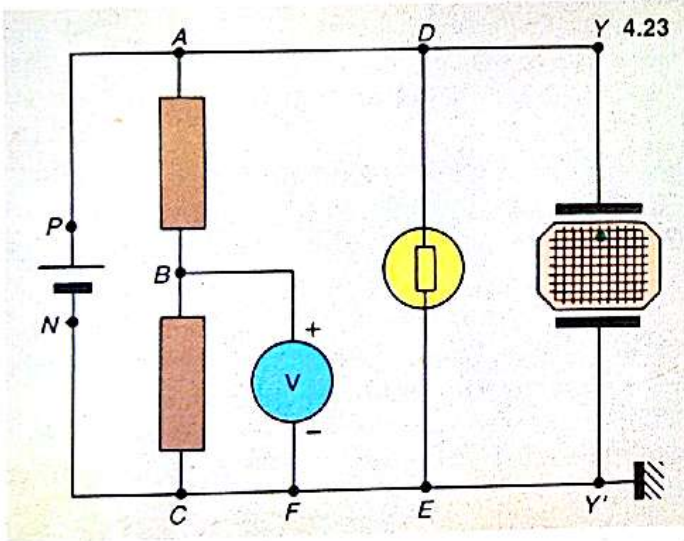
4.22 Le schéma ci-après représente l'écran d'un oscillographe lors d'une mesure de tension continue.



4.22

- 1/ L'oscillographe est-il réglé sur la position balayage?
- 2/ Si l'entrée B est branchée au point M d'un circuit et la masse au point N, la tension u_{MN} est-elle positive ou négative?
- 3/ Le bouton de réglage de l'amplitude de la déviation verticale est sur la sensibilité 500 mV par division (1 division = 1 côté des carreaux). Quelle est la tension u_{MN} mesurée?
- 4/ On veut mesurer la tension aux bornes d'une batterie d'accumulateurs d'automobile. L'oscillographe possède les sensibilités 20, 10, 5, 2 et 1 V/division. Quelle sensibilité doit-on choisir?

4.23 On considère le montage ci-dessous. L'oscil-

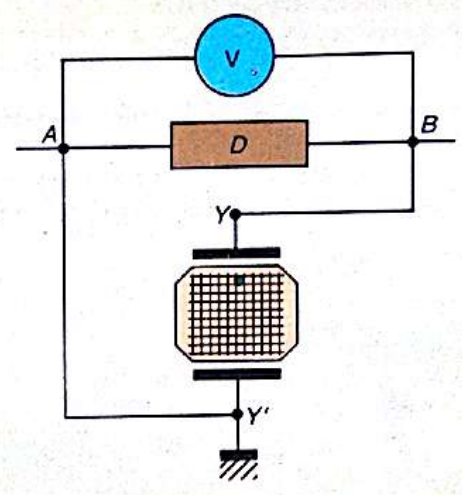


4.23

lographe est utilisé sur la sensibilité $k=2$ V/division. Le spot dévie de 3 divisions. Le voltmètre, utilisé sur le calibre 3 V, comporte 150 divisions. L'aiguille se fixe sur la graduation 100.

- 1/ Déterminer u_{PN} , u_{ED} et u_{AB} . Représenter par des flèches ces trois tensions.
- 2/ Le voltmètre est de classe 2. Donner la précision de la mesure de u_{BC} .

✶ 4.24 Un voltmètre et un oscillographe sont branchés aux bornes d'un dipôle parcouru par un courant comme indiqué ci-dessous. Le spot dévie de 3 divisions vers le haut pour le branchement (B, A) \leftrightarrow (Y, Y').



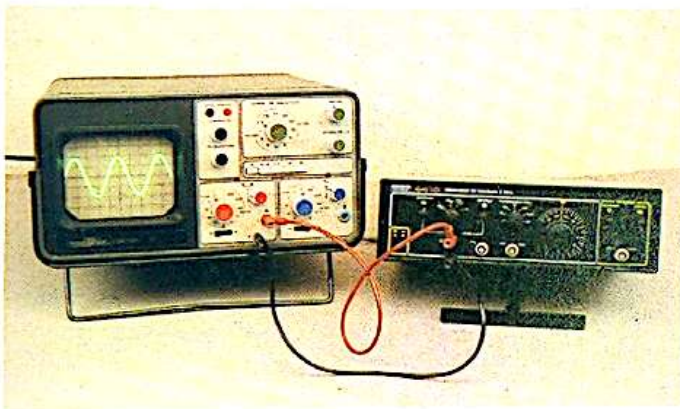
4.24

- 1/ Le voltmètre n'est pas à zéro central. Indiquer sur le schéma ci-dessus la borne + d'entrée du courant dans le voltmètre.
- 2/ Le voltmètre possède les calibres 3 V, 1 V, 0,3 V, et un cadran comportant 150 divisions. Utilisé sur 3 V, la déviation de l'aiguille est de 30 divisions.
 - a/ Déterminer u_{BA} et u_{AB} .
 - b/ Quel est le calibre le mieux adapté? Quelle est alors la nouvelle déviation de l'aiguille?
 - c/ Quel est le coefficient de sensibilité en volts par division de l'oscillographe?
- 3/ Quelle serait la déviation du spot si $u_{AB} = +1$ V?

Existence de tensions variables

5.1 visualisation d'une tension alternative

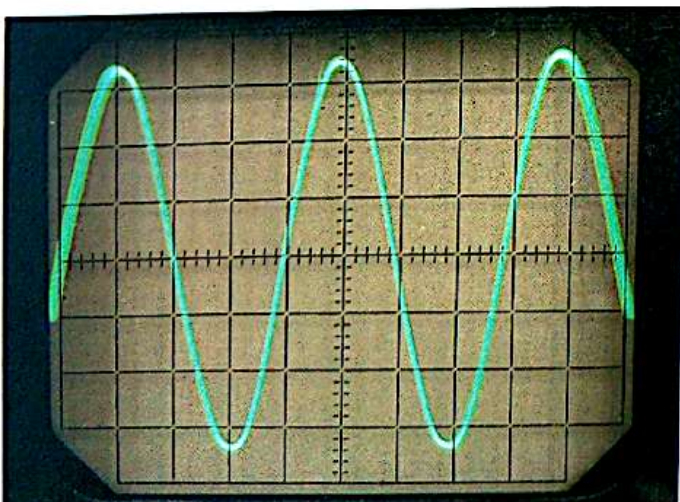
Le montage de la photographie 1 comporte un générateur « basse fréquence », ou « B.F. ». Les bornes de ce générateur sont reliées aux bornes d'entrée d'un oscilloscope dont la base de temps fonctionne.



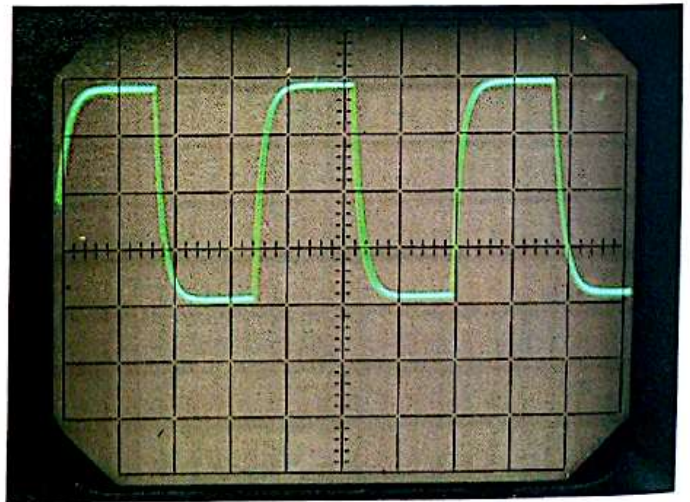
1. Le générateur de basse fréquence délivre une tension sinusoïdale. La fréquence de cette tension peut être choisie.

Le spot traverse l'écran en décrivant des ondulations : la tension délivrée par le générateur B.F. n'est pas constante mais variable au cours du temps. La courbe régulière décrite par le spot est une sinusoïde (photo 2) : la tension est sinusoïdale; elle prend alternativement des

valeurs positives et négatives. Une telle tension, alternativement positive et négative, est dite **alternative**. Les photographies 3 et 5 représentent, elles, des tensions alternatives *non sinusoïdales* visualisées sur l'écran d'un oscilloscope.



2. Tension sinusoïdale; c'est une tension alternative particulière.



3. Tension observée aux bornes d'un circuit. Cette tension est alternative non sinusoïdale.

5.2 période, fréquence

Les tensions précédemment visualisées varient au cours du temps. Ces variations sont régulières, **périodiques** : la tension reprend la même valeur et subit la même variation à des intervalles de temps successifs égaux (fig. 4). Un tel intervalle est appelé **période** et noté T .

- La période est la plus petite durée au bout de laquelle un phénomène se reproduit identique à lui-même.

L'inverse de la période est la **fréquence** notée N :

$$N = \frac{1}{T}$$

| \

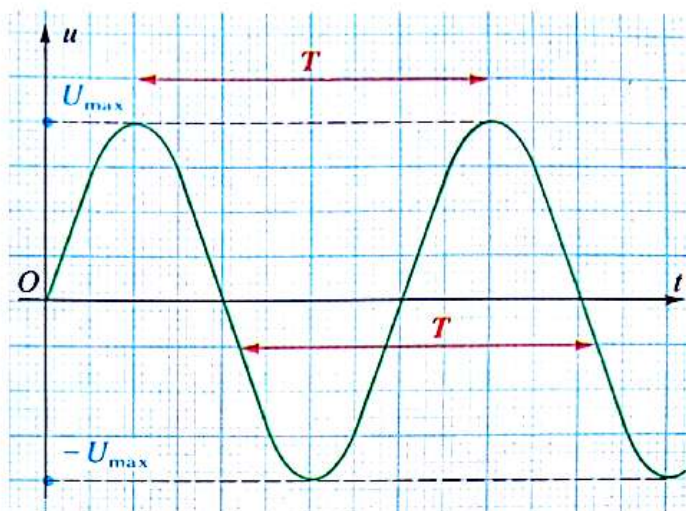
Hz s

L'unité de fréquence est le **hertz** (symbole : Hz), l'unité de durée étant la seconde.

5.3 tension de crête, amplitude

Une tension alternative périodique varie au cours du temps entre une valeur maximale (positive) et une valeur minimale (négative). L'oscillographe permet de mesurer ces valeurs.

Dans le cas d'une tension alternative sinusoïdale, ces maximums ont même valeur absolue : cette valeur est appelée **tension de crête** ou **amplitude de tension**. Elle est notée U_{\max} (fig. 4).



4. Période et amplitude d'une tension alternative sinusoïdale.

Application 1 :

Mesurer la fréquence de la tension de forme triangulaire visualisée sur la photographie 5. La base de temps de l'oscillographe est sur la sensibilité 0,5 ms/cm.

Nous observons 2 périodes qui occupent une largeur de 8 cm sur l'écran (distance entre les deux sommets extrêmes par exemple). Pour parcourir horizontalement ces 8 cm, le spot met une durée

$$\theta = 0,5 \cdot 10^{-3} \times 8 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ s.}$$

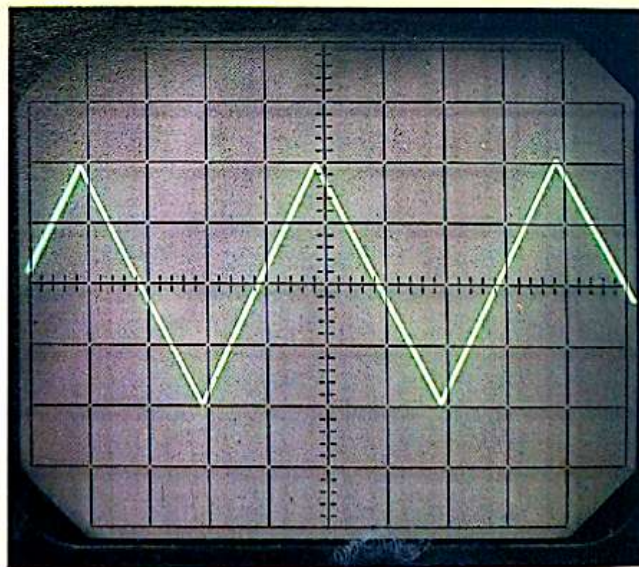
Cette durée correspond à 2 périodes : $\theta = 2T$.

D'où :

$$T = \frac{\theta}{2} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ s.}$$

La fréquence de cette tension triangulaire vaut :

$$N = \frac{1}{T} = 500 \text{ Hz.}$$



5. Tension de forme triangulaire; cette tension est alternative symétrique.

5.4 tension du secteur délivrée par l'E.D.F.

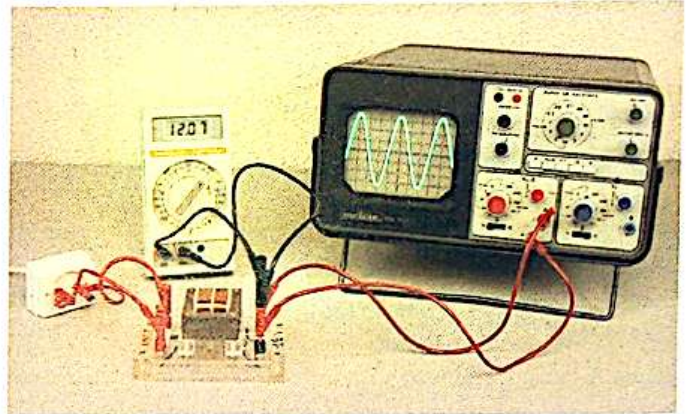
L'E.D.F. délivre aux bornes des prises de courant une tension dite « de 220 V ». Les oscillographes ne supportant pas habituellement une telle tension^(*), nous utilisons un transformateur (voir à titre de document, en fin de chapitre) qui permet d'abaisser la tension du secteur sans modifier la « forme » de ses variations au cours du temps (photo 6).

La tension du secteur étant appliquée à l'entrée (primaire) du transformateur, branchons les bornes de sortie (secondaire) à l'oscillographe : la tension observée est sinusoïdale, de période $T = 1/50$ s, de fréquence 50 Hz.

- La tension du secteur délivrée par l'E.D.F. est sinusoïdale, de fréquence 50 Hz.

En Suisse et aux États-Unis la fréquence du secteur est 60 Hz.

6. Le multimètre mesure la tension efficace aux bornes du secondaire du transformateur 220 V/12 V. L'oscillographe permet de visualiser les variations de la tension entre ces mêmes bornes. ▶



Application 2 :

Déterminer la fréquence et l'amplitude de la tension, aux bornes du secondaire du transformateur, des photographies 6 et 2. Pour l'oscillographe, les réglages sont :

horizontalement : 5 ms/cm;
verticalement : 5 V/cm.

Sur l'écran, une période T correspond à un étalement horizontal de 4 cm (4 divisions). En durée cela équivaut à :

$$T = 4 \times 5 \cdot 10^{-3} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ s} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ s}.$$

La fréquence vaut donc :

$$N = \frac{1}{2 \cdot 10^{-2}} = 50 \text{ Hz}.$$

De part et d'autre de la ligne horizontale médiane, le spot s'écarte au maximum d'environ 3,4 cm. A cette déviation maximale correspond l'amplitude de la tension U_{\max} :

$$U_{\max} \approx 5 \times 3,4 = 17 \text{ V}.$$

(*) En outre, la masse des oscillographes est habituellement reliée à la terre; le branchement sur une prise du secteur peut provoquer un court-circuit.

Compléments mathématiques

fonctions périodiques

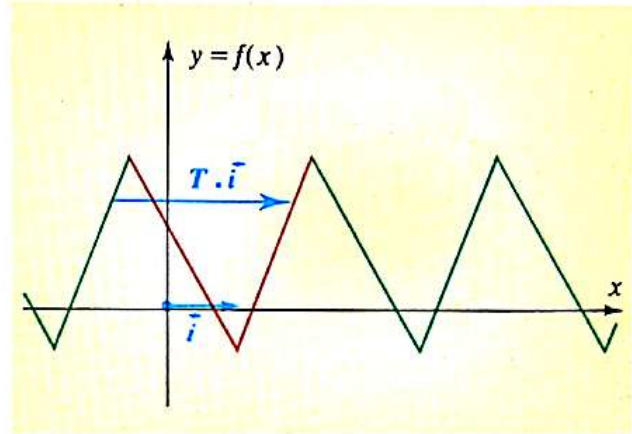
Soit f une fonction définie sur un ensemble D de réels. On dit que f est *périodique* si et seulement si il existe un réel non nul t tel que pour tout élément x de D , $x+t$ est élément de D et

$$f(x+t) = f(x).$$

On dit alors que t est une *période* de f . L'ensemble des périodes de f admet un plus petit élément T ; on dit que T est la *période* de f . Les autres périodes sont alors des multiples de T :

$$t = k \cdot T, \quad k \in \mathbb{Z}.$$

Si f est de période T , sa courbe représentative est invariante pour toutes les translations de vecteur $k \cdot T\vec{i}$, où k est entier relatif.



5.5 tension efficace

Dans le cas de tensions sinusoïdales, le voltmètre doit être utilisé en alternatif (commutateur en position \sim et lecture sur la graduation adaptée). Il mesure alors une tension inférieure à la tension de crête, appelée **tension efficace**.

Dans l'application 2, on mesure la tension de crête à la sortie d'un transformateur : $U_{\max} = 17 \text{ V}$. Or, sur la photographie 6, le voltmètre nous indique une valeur différente : 12 V .

Par définition :

- La valeur efficace d'une tension alternative sinusoïdale est égale à la tension continue qui, appliquée aux bornes d'un appareil de chauffage, produit le même effet que la tension alternative sinusoïdale appliquée au même appareil, pendant la même durée.

La théorie montre que la valeur efficace U et l'amplitude U_{\max} sont liées, dans le cas d'une tension sinusoïdale, par la relation :

$$U = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}.$$

Vérifions que cette définition est en accord avec nos mesures. Le calcul donne : $U = 17/\sqrt{2} \approx 12 \text{ V}$. C'est bien ce qu'indique le voltmètre.

Dans les habitations, la tension efficace aux bornes d'une prise de courant est 220 V environ.

Remarque : la loi d'additivité des tensions continues établie au chapitre précédent ne s'applique généralement plus pour les valeurs efficaces de tensions sinusoïdales.

Application 3 :

Quelle est l'amplitude de la tension du secteur?

La valeur efficace de la tension du secteur est 220 V .

Donc

$$U_{\max} = U \cdot \sqrt{2} \\ = 220 \times \sqrt{2} \approx 311 \text{ V}.$$

La tension du secteur varie en fait entre -311 V et $+311 \text{ V}$.

La tension « 220 V » est une tension efficace moyenne. Elle dépend de l'immeuble, du quartier où l'on se trouve (éloignement plus ou moins important du transformateur), de l'heure dans la journée (elle chute le soir car un grand nombre d'appareils sont alors branchés); elle reste tout de même voisine de 220 V .

DOCUMENT

Les alternateurs

L'alternateur de bicyclette

Branchons les bornes d'un alternateur de bicyclette à l'entrée d'un oscillographe. Lorsque nous faisons tourner l'alternateur, nous visualisons une tension alternative, périodique si la vitesse de rotation est régulière (fig. 7). Si nous augmentons la vitesse de rotation, la période diminue tandis que l'amplitude augmente.

D'une manière générale, on appelle alternateur tout appareil susceptible de délivrer une tension alternative.

Démontons l'alternateur de bicyclette : il est essentiellement composé d'un aimant susceptible de tourner et d'une bobine de fil de cuivre reliée à *A* et *B*. C'est la rotation de l'aimant devant la bobine qui engendre aux bornes *A* et *B* de celle-ci une tension alternative; l'aimant constitue l'*inducteur*.

Prenons maintenant une bobine et un aimant, comportant deux pôles, susceptible de tourner comme l'indique la figure 8. Relions les bornes *A* et *B* de la bobine à l'entrée d'un oscillographe.

Si l'aimant tourne, nous observons sur l'écran la tension u_{AB} en fonction du temps; cette tension est bien alternative.

Nous obtenons aussi une tension variable, alternative, aux bornes de la bobine en faisant tourner celle-ci sur elle-même devant l'un des pôles de l'aimant maintenu fixe.

Il suffit donc que l'aimant et la bobine soient en mouvement relatif pour qu'apparaisse une tension aux bornes de la bobine.

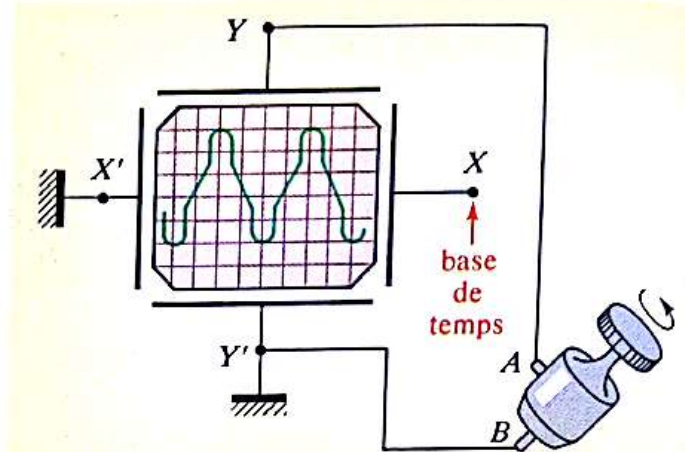
Les alternateurs industriels

Il existe deux types principaux d'alternateurs industriels selon le mode d'entraînement de la partie tournante, ou rotor.

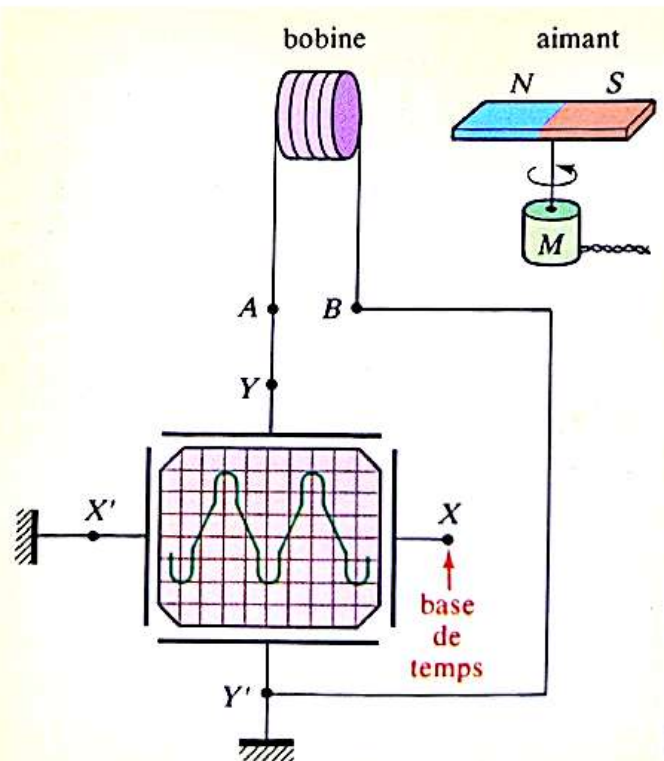
Tout d'abord, l'entraînement du rotor peut se faire par une machine à vapeur dont le mouvement n'est jamais très rapide : l'inducteur tournera, par exemple, à raison de un ou deux tours par seconde, mais comportera beaucoup de pôles, environ une cinquantaine, pour que la fréquence du courant soit suffisante. Ces alternateurs peuvent être actionnés par les turbines des barrages hydrauliques de faible hauteur et de grand débit; par exemple au barrage de Génissiat, dans l'Ain, le rotor d'axe vertical a un diamètre de 7 m; il tourne à 150 tours. min^{-1} , et comporte 40 pôles alternés; la fréquence de la tension est ainsi égale à 50 Hz. La tension efficace aux bornes est de 20000 V.

En second lieu, le rotor peut être entraîné par une turbine à vapeur, dont la vitesse de rotation est toujours considérable. Le diamètre de l'inducteur n'est plus que de 1 m pour une vitesse de rotation de 1500 tours. min^{-1} et de 70 cm pour une vitesse de 3000 tours. min^{-1} ; sous l'effet de la force centrifuge, le rotor éclaterait si son diamètre était trop grand. En conséquence, le nombre des bobines est réduit à 2 ou 4, et l'on a un turbo-alternateur bipolaire ou tétrapolaire.

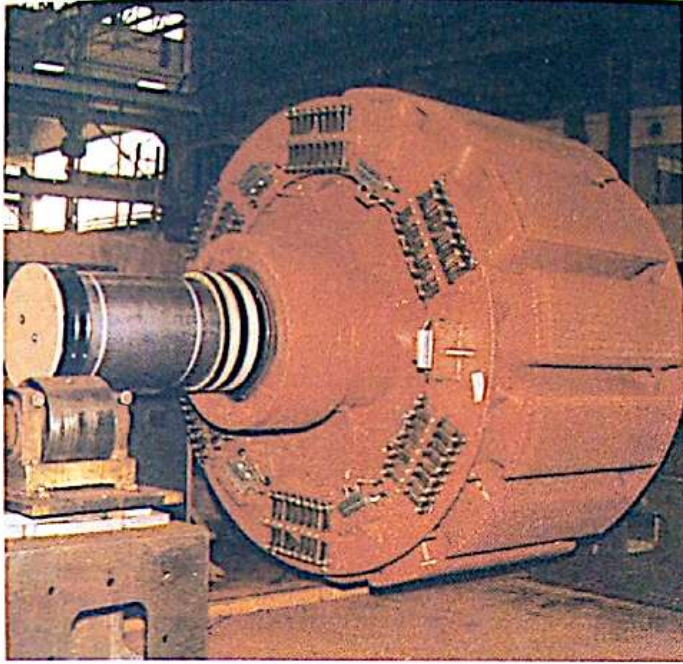
A la centrale de Saint-Denis, un alternateur bipolaire fournit un courant de fréquence 50 Hz en tournant à 3000 tours. min^{-1} , la tension efficace est 10500 V; la turbine fonctionne avec une pression de vapeur de 54 bars à 450°C.



7. Visualisation de la tension engendrée par un alternateur de bicyclette.



8. Lorsque l'aimant tourne devant la bobine, il apparaît aux bornes de celle-ci une tension u_{AB} alternative.



9. Alternateur destiné à une centrale E.D.F. A gauche la partie tournante (ou rotor), à droite la partie fixe (ou stator).

Les transformateurs

Les transformateurs sont des appareils électriques qui permettent d'élever ou d'abaisser la valeur efficace d'une tension sinusoïdale. Ils ne fonctionnent pas en courant continu.

Un transformateur comprend deux bobines de fil de cuivre vernis, enroulées autour d'un noyau de fer doux constitué de tôles empilées formant une carcasse fermée (photo 10).

A chaque bobine correspondent deux bornes. Le transformateur est normalement alimenté du côté de la bobine dite « primaire » ; on recueille la tension abaissée ou élevée aux bornes de l'autre bobine appelée « secondaire ».

Expérimentalement, on montre qu'entre les grandeurs efficaces, tension U_1 à l'entrée et tension U_2 à la sortie, existe un rapport k constant :

$$k = \frac{U_2}{U_1}$$

k est appelé le *rapport de transformation*. Pour un transformateur 220 V/12 V par exemple, k vaut $12/220 = 0,0545$.

Un transformateur est un appareil réversible : on peut l'alimenter sur le secondaire et recueillir la tension du primaire. Cependant cette utilisation n'est généralement pas recommandée.

Un transformateur est construit pour une puissance donnée, à ne pas dépasser.

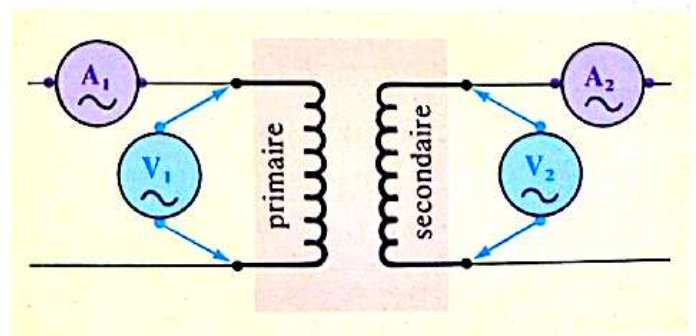
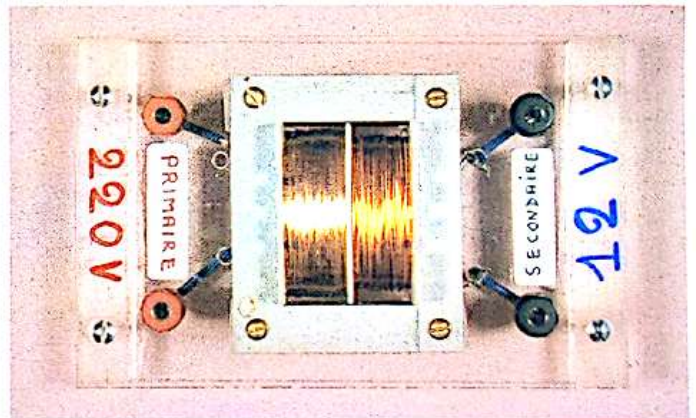
Remarquons que lorsque le secondaire ne débite pas (circuit secondaire ouvert), l'intensité du courant dans le primaire est pratiquement nulle : le transformateur peut rester branché sans pratiquement consommer de courant.

On distingue dans le réseau E.D.F. :

- Des transformateurs éleveurs de tension : l'E.D.F., pour transporter le courant électrique avec le minimum de pertes, élève la tension de 5 kV environ fournie par les alternateurs jusqu'à 150 kV, 200 kV, voire même 400 kV (lignes à très haute tension).

- Des transformateurs abaisseurs de tension : après le transport, pour des raisons de sécurité, l'E.D.F. abaisse la tension, dans des postes de transformation successifs, jusqu'à 220 V.

De nombreux appareils fonctionnant avec des tensions de quelques volts, par raison de sécurité, sont équipés de transformateurs qui abaissent la tension du secteur (220 V/12 V ou 220 V/8 V par exemple). Les postes de télévision contiennent, en revanche, des transformateurs éleveurs de tension.



10. Transformateur 220 V/12 V. ►

EXERCICES

Faire le point

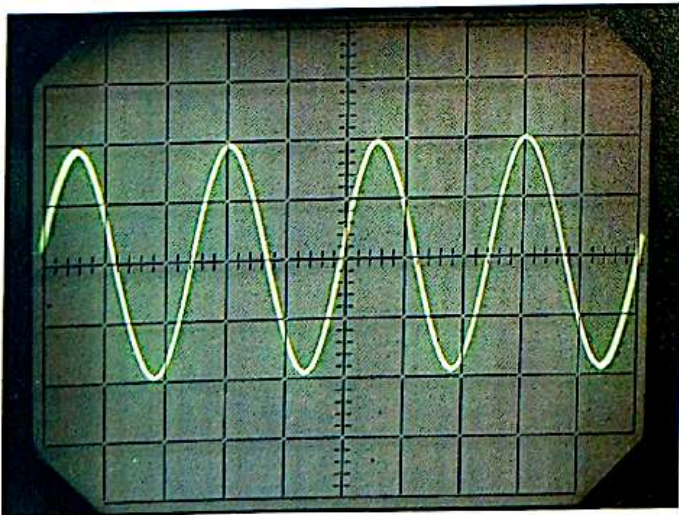
- Différencier une tension continue et une tension variable.
- Qu'est-ce qu'une tension périodique?
- Définir la période d'un phénomène périodique.
- Quelle est l'unité de fréquence?
- Définir l'amplitude d'une tension alternative sinusoïdale.
- Quelle relation y a-t-il entre l'amplitude et la valeur efficace d'une tension alternative sinusoïdale?

5.1 La période d'une tension alternative sinusoïdale est de 10^{-3} s. Quelle est sa fréquence?

5.2 La tension du secteur a une fréquence de 50 Hz en France, de 60 Hz aux États-Unis. Quelles sont les périodes?

5.3 La tension du secteur vaut 220 V. Qu'est-ce que cela signifie? Quelles sont l'amplitude et la valeur efficace de cette tension?

5.4 Le balayage d'un oscilloscope étant déclenché, le spot décrit la ligne horizontale du centre de l'écran. Les bornes de sortie d'un générateur basse fréquence (générateur BF) sont reliées aux bornes d'entrée de l'oscilloscope. La tension appliquée est visualisée sur l'écran photographié ci-dessous. Le réglage de l'oscilloscope est le suivant : sensibilité verticale : 500 mV/division; durée de balayage : 0,2 ms/division.

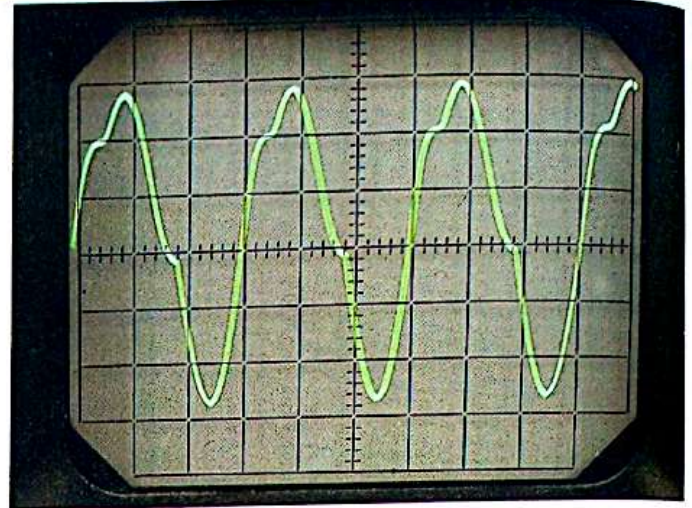


1/ La tension visualisée est-elle continue? variable? alternative sinusoïdale?

2/ Déterminer la période et la fréquence de cette tension.

3/ Déterminer la valeur efficace de cette tension.

5.5 La tension aux bornes d'un alternateur est visualisée sur l'écran d'un oscilloscope photographié ci-après. Le réglage est le suivant : sensibilité verticale : 2 V/division; durée de balayage : 5 ms/division. En l'absence de tension, le spot décrit la ligne horizontale médiane.

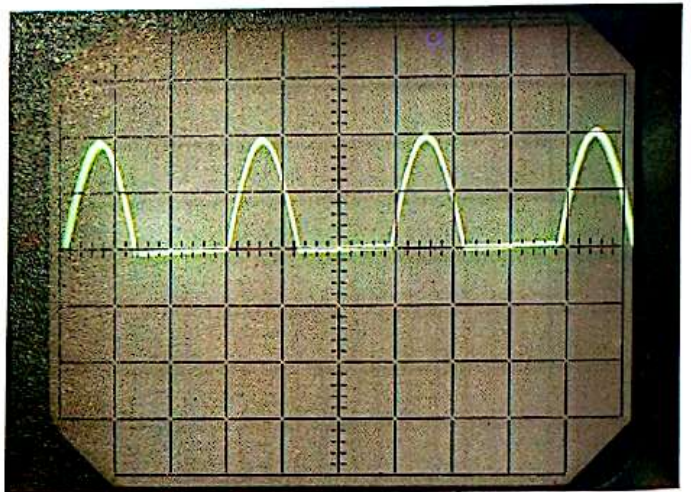


1/ La tension est-elle continue? variable? sinusoïdale?

2/ Déterminer la fréquence de cette tension.

3/ Déterminer l'amplitude de cette tension. Peut-on calculer la valeur efficace?

5.6 Sur l'écran d'un oscilloscope est visualisée la tension aux bornes d'un composant électronique appelé diode et inséré en série dans un circuit alimenté par un générateur de tension alternative sinusoïdale. Le réglage de l'oscilloscope est le suivant : sensibilité verticale : 2 V/division; durée de la balayage : 0,2 ms/division. En l'absence de tension appliquée, le spot décrit la ligne horizontale médiane.



1/ Cette tension est-elle continue? variable? périodique? alternative? sinusoïdale?

2/ Calculer la fréquence de cette tension.

3/ Déterminer la tension maximale.

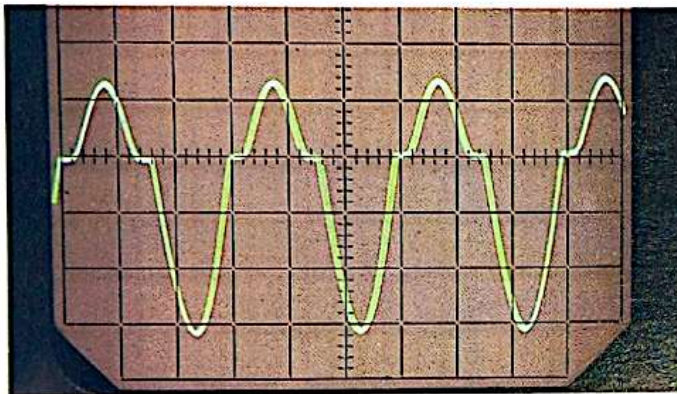
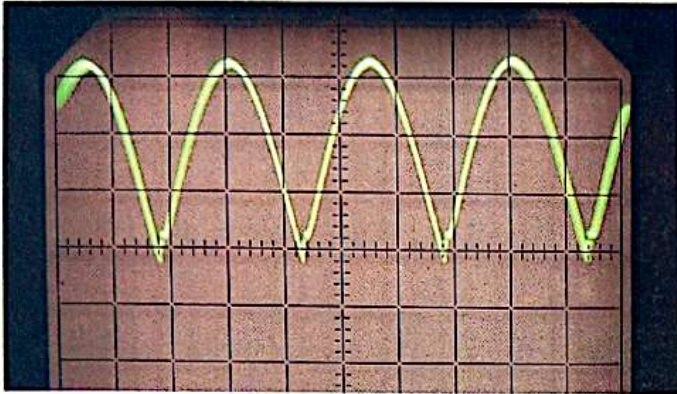
5.7 Deux tensions électriques (a et b) sont visualisées successivement sur l'écran d'un oscilloscope. Le réglage de l'oscilloscope est le suivant : sensibilité verticale : 0,5 V/division; durée de balayage : 50 μ s/division.

En l'absence de tension le spot décrit la ligne horizontale médiane dans le premier cas. Dans le second cas, il décrit la ligne horizontale située à une division au-dessus de la ligne médiane.

1/ Caractériser les tensions observées.

2/ Déterminer la période et la fréquence de chaque tension.

3/ Déterminer les valeurs maximale (positive) et minimale (négative) de chaque tension.

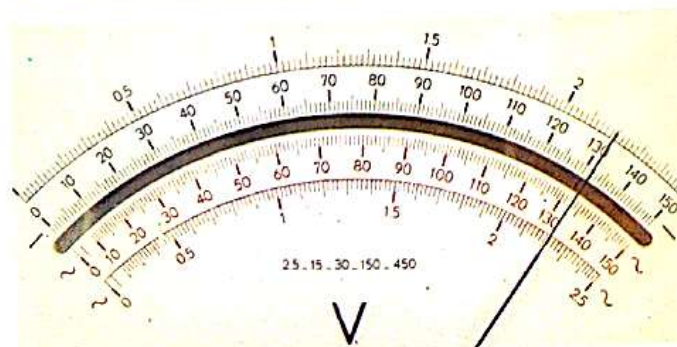


5.8 Un générateur délivre une tension sinusoïdale de fréquence 2 kHz et de valeur efficace 6 V.

- 1/ Quelle est la tension de crête?
- 2/ Quelle est la période de cette tension?
- 3/ Ce générateur est branché aux plaques de déviation verticale d'un oscilloscope de sensibilité verticale 2 V/division. Dessiner en grandeur nature ce que l'on observe sur l'écran de l'oscilloscope si :
 - a/ la base de temps n'est pas branchée;
 - b/ la base de temps est branchée sur la sensibilité 0,1 ms/division.

Mesure d'une tension efficace

5.9 Le voltmètre ci-dessous mesure une tension efficace entre deux points d'un circuit dans lequel circule un courant sinusoïdal. On utilise le calibre 15 V.



1/ Sur quelle graduation doit-on lire la déviation de l'aiguille?

2/ La déviation de l'aiguille est de 132 divisions. Déterminer la tension efficace, la tension de crête.

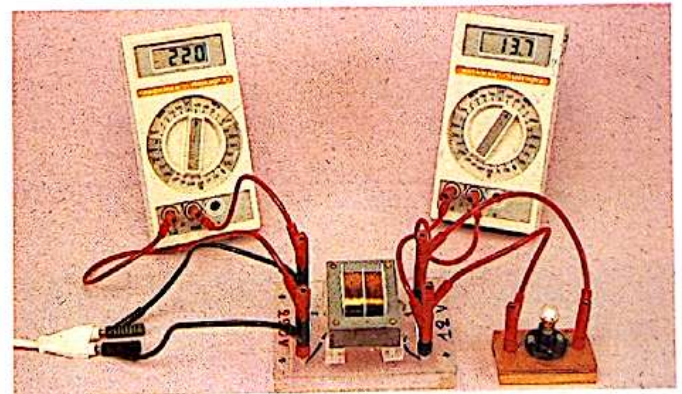
3/ Sachant que la classe de cet appareil est 2 en courant alternatif, déterminer l'incertitude et le taux d'incertitude de la mesure.

5.10 La photographie ci-dessous est celle d'un multimètre à aiguille.



- 1/ Quelle est la grandeur électrique mesurée?
- 2/ La mesure correspond-elle à une mesure en courant continu ou en courant sinusoïdal.
- 3/ Quel est le calibre utilisé?
- 4/ L'aiguille est arrêtée entre la graduation 24 et la graduation 25. Quelle est la mesure de la grandeur électrique? Déterminer l'amplitude de cette grandeur.
- 5/ La classe de cet appareil est 2 en courant alternatif. Quel est le taux d'incertitude de la mesure?

5.11 La photographie ci-dessous représente un transformateur 220 V - 12 V utilisé pour alimenter une lampe. Les deux appareils sont des multimètres numériques. (Voir documents chapitres 4 et 5.)



- 1/ Comment sont branchés les multimètres? Faire un schéma du montage.
- 2/ Quelles sont les grandeurs électriques qu'il mesure au primaire et au secondaire du transformateur?
- 3/ En se reportant aux documents des chapitres 4 et 5, quels sont les calibres utilisés?
- 4/ Donner la mesure des grandeurs électriques au primaire et au secondaire.
- 5/ Le constructeur donne comme incertitude de la mesure en courant alternatif : 0,75 % de la mesure +3 digits (3 digits correspondant à 3 fois l'unité du dernier chiffre lumineux). Déterminer le taux d'incertitude des deux mesures.

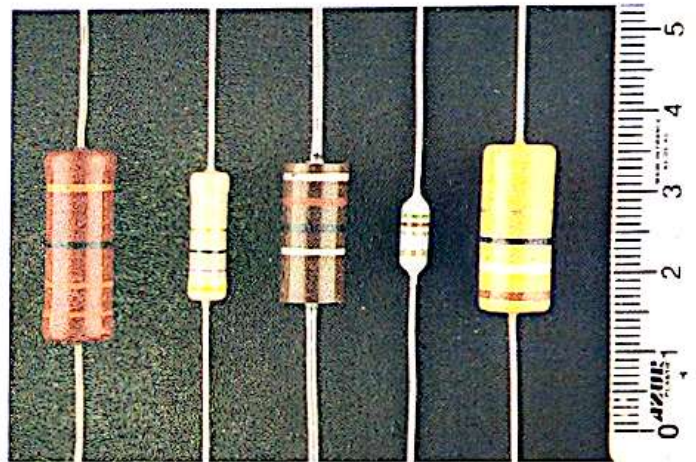
6.

Conducteurs ohmiques

6.1 le conducteur ohmique

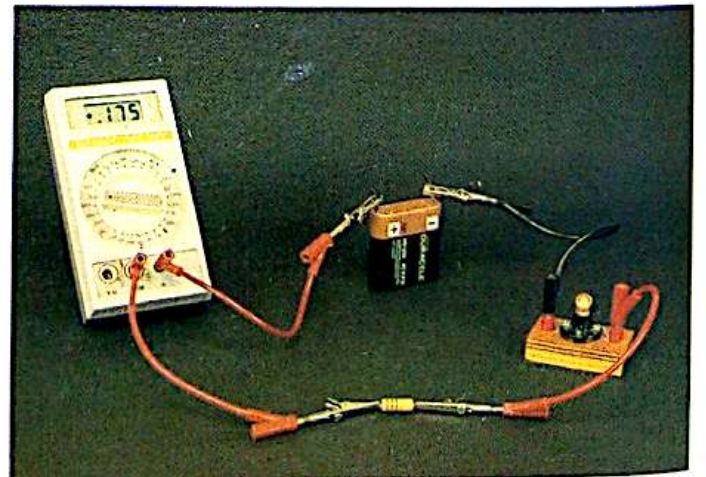
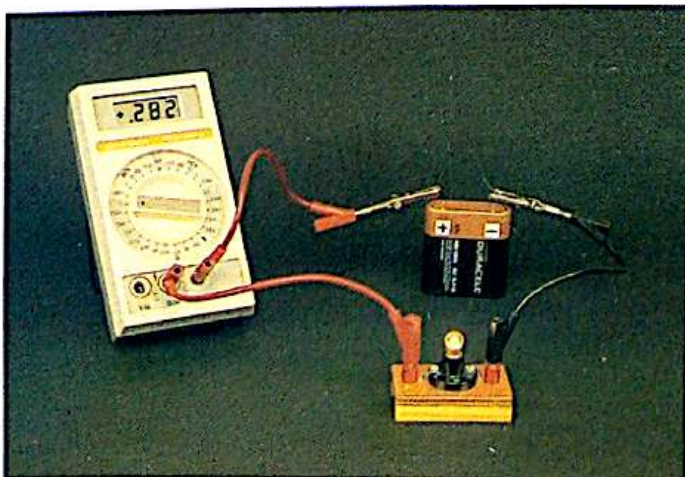
Sur la photographie 1 apparaissent des dipôles très utilisés en électronique, appelés conducteurs ohmiques(*) ou plus communément «résistances» (nom officiel : *résistor*). Des anneaux de couleur les différencient. Les résistances de ce type contiennent du carbone (voir document en fin de chapitre). Un fil métallique, tel le filament d'une lampe, constitue aussi un conducteur ohmique.

Les photographies 2 montrent qu'une résistance au carbone conduit le courant électrique et prélève une partie de la tension délivrée par le générateur.



1. Différents conducteurs ohmiques et leur représentation symbolique.

(*) Du nom du physicien allemand Ohm (1787-1854).



2. Quand un conducteur ohmique est placé en série avec la lampe, cette dernière brille moins; le conducteur accapare une partie de la tension délivrée par le générateur et l'intensité dans le circuit diminue.

6.2 caractéristique intensité-tension

Branchons en série un générateur maintenant entre ses bornes une tension réglable, un conducteur ohmique (A, B) et un ampèremètre (montage ci-contre).

Mesurons la tension u_{AB} aux bornes du conducteur ohmique (A, B) et l'intensité I du courant qui le traverse. A chaque valeur de u_{AB} correspond une valeur différente de I .

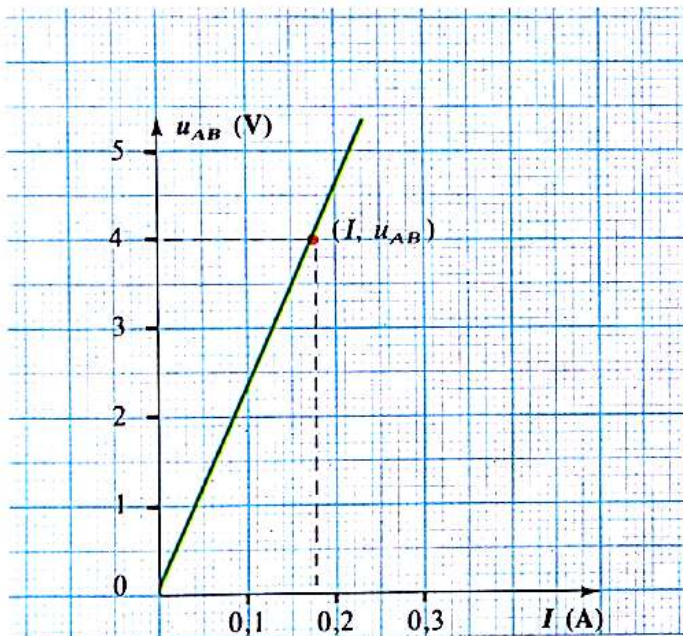
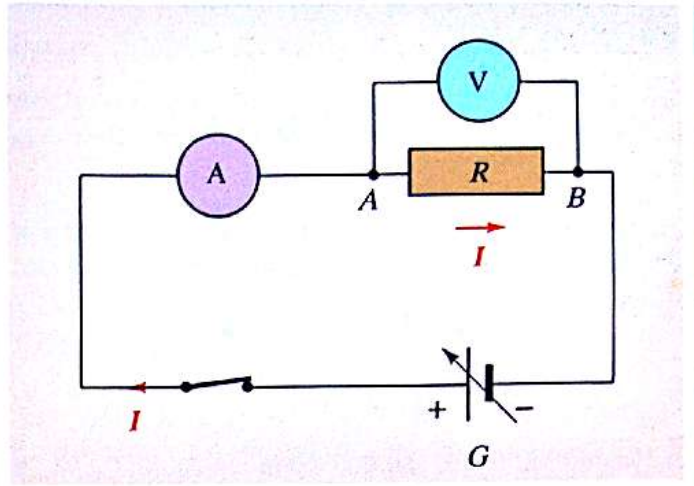
Chaque couple (u_{AB}, I) définit un état (ou point) de fonctionnement de ce dipôle.

L'ensemble de ces couples caractérise le dipôle.

La représentation graphique de la fonction $I \mapsto u_{AB}$ donne la caractéristique intensité-tension du dipôle (A, B).

L'étude expérimentale ci-après (page 59) montre que :

- La caractéristique d'un conducteur ohmique est une droite passant par l'origine, si la température du conducteur reste fixe (voir paragraphe 6.5).



3. Caractéristique intensité-tension d'un conducteur ohmique

- Un conducteur ohmique fonctionne de la même manière, que le courant le traverse dans un sens ou dans l'autre : un conducteur ohmique est un dipôle symétrique.

Notons bien que :

- Lorsque la tension u_{AB} est positive, le courant traverse le dipôle de A vers B :

$$u_{AB} > 0 \leftrightarrow \text{courant de } A \text{ vers } B.$$

- Lorsque la tension u_{AB} est négative (u_{BA} positive), à l'inverse, le courant traverse le dipôle de B vers A :

$$u_{AB} < 0 \leftrightarrow \text{courant de } B \text{ vers } A.$$

6.3 loi d'Ohm

La loi d'Ohm ne fait que traduire les résultats précédents, qui montrent qu'il existe une relation linéaire entre u_{AB} et I :

• Lorsqu'un courant d'intensité I traverse un conducteur ohmique (A, B) de A vers B, la tension u_{AB} à ses bornes est :

$$u_{AB} = R \cdot I, \quad u_{AB} > 0.$$

V	Ω	A

La symétrie du dipôle fait que lorsqu'un courant I' va de B vers A, on a de même :

$$u_{BA} = R \cdot I', \quad u_{BA} > 0,$$

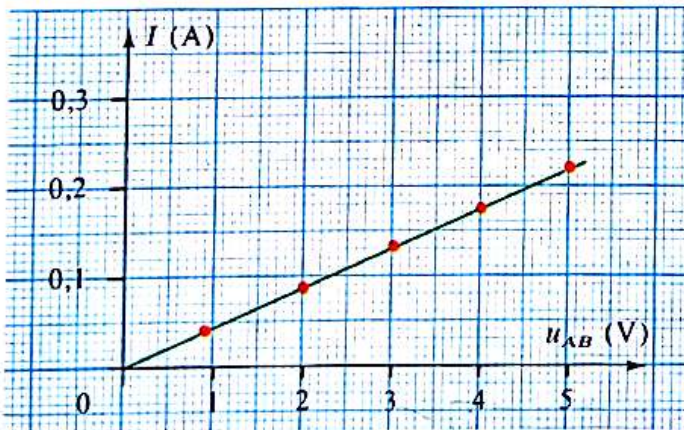
R gardant la même valeur que dans le cas précédent.

Le coefficient de proportionnalité positif (pente de la caractéristique) R est appelé résistance du conducteur ohmique.

Avec u_{AB} en volts, I en ampères, R est mesuré en ohms (symbole : Ω).

6.4 caractéristique tension-intensité conductance

Donnons (fig. 4) la représentation graphique de la fonction inverse à la précédente : $u_{AB} \mapsto I$. Nous traçons ainsi la caractéristique tension-intensité, qui est aussi une demi-droite issue de l'origine.



4. Caractéristiques tension-intensité d'un conducteur ohmique.

La loi d'Ohm s'écrit alors pour $u_{AB} > 0$, le courant allant de A vers B :

$$I = G \cdot u_{AB}.$$

A	S	V

Le coefficient de proportionnalité positif G est appelé conductance du conducteur ohmique. Avec u_{AB} en volts, I en ampères, G est mesurée en siemens(*) (symbole : S).

Application 1 :

Aux bornes C et D d'un conducteur ohmique de résistance 470Ω , on applique une tension

$$u_{CD} = 12 \text{ V}.$$

1/ Quels sont le sens et l'intensité du courant qui le traverse?

2/ Qu'en est-il pour $u_{CD} = -12 \text{ V}$?

1/ La tension u_{CD} est positive : le courant traverse le conducteur de C vers D. La loi d'Ohm donne : $u_{CD} = R \cdot I$, soit

$$I = \frac{u_{CD}}{R} = \frac{12}{470} = 0,025 \text{ A}.$$

2/ Avec $u_{CD} < 0$ soit $u_{DC} > 0$, le courant traverse le conducteur de D vers C avec une intensité de $0,025 \text{ A}$, car le conducteur ohmique est symétrique.

Application 2 :

Un conducteur ohmique (C, D) de conductance $G = 0,1 \text{ S}$ est traversé par un courant d'intensité $I = 200 \text{ mA}$ allant de C vers D. Calculer la tension u_{DC} .

Le courant circule de C vers D, donc $u_{CD} > 0$ et :

$$u_{CD} = \frac{I}{G} = \frac{0,2}{0,1} = 2 \text{ V},$$

d'où :

$$u_{DC} = -2 \text{ V}.$$

Fiche expérimentale 1

caractéristique d'un conducteur ohmique

1. Le courant traverse le dipôle de A vers B

Le générateur G maintient aux bornes du conducteur ohmique une tension u_{AB} positive réglable et fait circuler un courant de A vers B . Pour différentes valeurs de u_{AB} , nous mesurons l'intensité correspondante. Nous nous limitons à des courants d'intensité faible pour éviter que le conducteur ne chauffe; sa température est pratiquement constante.

Un couple de mesure (u_{AB} , I) caractérise un état de fonctionnement du dipôle (A , B).

Dans un plan muni d'un repère cartésien, la courbe

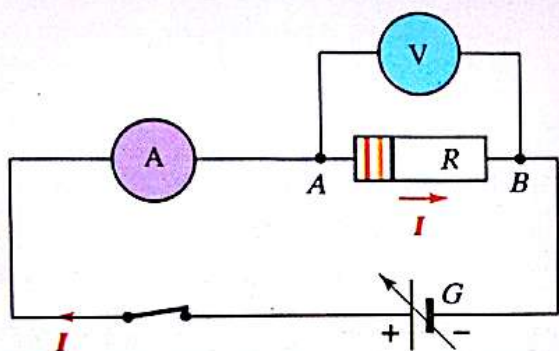
représentative de la fonction $I \mapsto u_{AB}$ est la caractéristique intensité-tension du dipôle (A , B), le courant traversant ce dernier de A vers B . Cette caractéristique est une demi-droite passant par l'origine, d'équation :

$$u_{AB} = R \cdot I, \quad u_{AB} > 0.$$

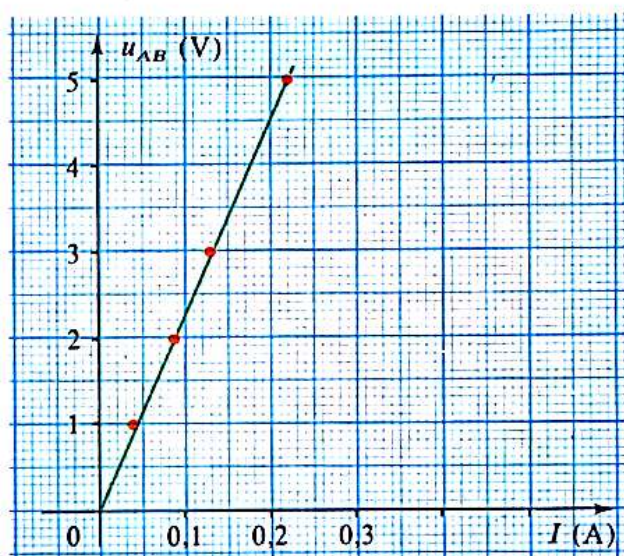
La pente R peut être déterminée à partir des coordonnées d'un point quelconque de la caractéristique.

Prenons par exemple M (0,22 A ; 5 V) :

$$R = \frac{5}{0,22} = 22,7 \Omega.$$



u_{AB} (V)	0	1	2	3	4	5
I (A)	0	0,04	0,09	0,13	0,17	0,22

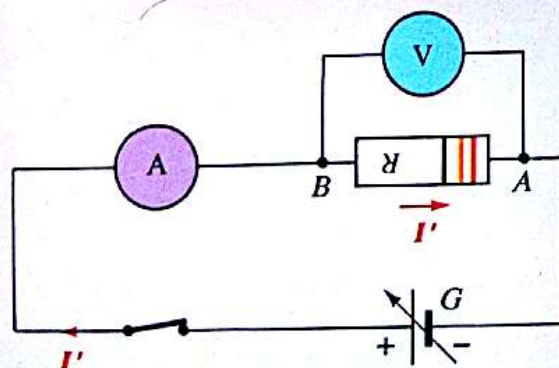


2. Le courant traverse le dipôle de B vers A

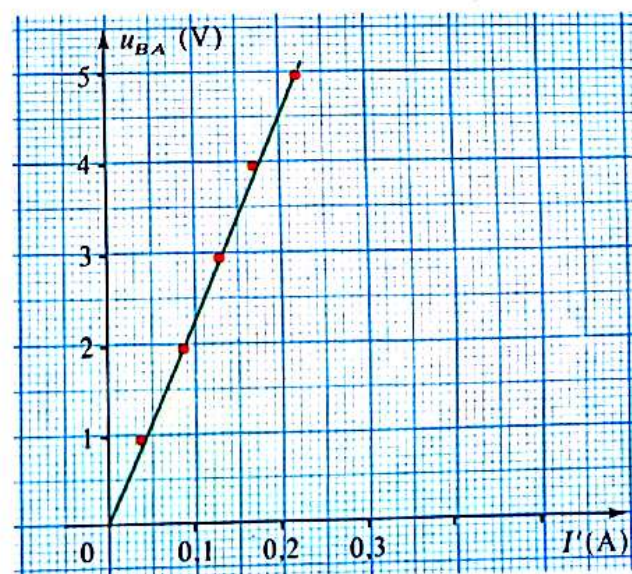
Si on retourne le dipôle, on retrouve les mêmes points de fonctionnement; un conducteur ohmique

est un dipôle symétrique. Le courant traversant le dipôle de B vers A , on a donc encore :

$$u_{BA} = R \cdot I', \quad u_{BA} > 0.$$



u_{BA} (V)	0	1	2	3	4	5
I' (A)	0	0,04	0,09	0,13	0,17	0,22



En comparant $u_{AB} = R \cdot I$ et $I = G \cdot u_{AB}$, il vient immédiatement :

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

Un conducteur de faible résistance a une grande conductance (il conduit bien le courant), et vice versa.

6.5 influence de la température limite de fonctionnement

La caractéristique d'un conducteur ohmique reste une droite tant que les valeurs de l'intensité du courant qui le traverse et de la tension à ses bornes ne sont pas trop grandes. En effet, l'énergie électrique dans un conducteur ohmique a pour effet d'élever sa température. Or quand la température augmente, la résistance $R = U/I$ varie : la relation $I \rightarrow U$ n'est plus alors linéaire.

L'étude d'une lampe (voir la seconde fiche expérimentale) met bien ce phénomène en évidence.

- La résistance R d'un conducteur ohmique est une constante qui caractérise ce conducteur à une température donnée.

La résistance des conducteurs ohmiques au carbone varie peu si l'on évite de dépasser l'intensité et la tension maximales prévues par le constructeur. Si l'on dépasse ces limites le conducteur ohmique chauffe, sa résistance varie; il peut même devenir brûlant et être finalement détruit.

Remarque : Comme le montre la fiche expérimentale, la résistance des conducteurs métalliques croît avec la température. Le taux de variation est sensiblement le même pour les différents métaux. Pour certains alliages, utilisés pour faire des résistances peu sensibles aux variations de température, ce taux de variation est très faible. Pour les semi-conducteurs, en revanche, la résistance décroît assez fortement avec la température.

6.6 étude d'un rhéostat

Nous disposons d'un rhéostat (photo 5) où l'on peut lire (23Ω ; 7 A). Il est constitué par un fil métallique d'alliage de fer et de nickel (dont la résistance varie très peu avec la température), qui entoure un support recouvert d'isolant.

Entre les bornes A et B , la longueur L du fil enroulé peut valoir plusieurs mètres. Un curseur est en contact avec le fil conducteur; en déplaçant le curseur, il est ainsi possible de régler la longueur ℓ du fil compris entre les bornes A et C .

Application 3 :

Pour un conducteur ohmique de résistance $R = 23 \Omega$, le fabricant indique une puissance maximale $\mathcal{P}_{\max} = 1 \text{ watt}$, à ne pas dépasser. Quelles sont la tension (U_{\max}) et l'intensité (I_{\max}) maximales à ne pas dépasser? On suppose qu'aux conditions limites d'utilisation, la résistance R n'a pratiquement pas varié malgré l'échauffement. On rappelle (classe de Quatrième) que la puissance \mathcal{P} reçue par un dipôle est le produit de la tension U par l'intensité I , soit :

$$\mathcal{P} = U \cdot I.$$

La tension U étant exprimée en volts et l'intensité en ampères, la puissance \mathcal{P} s'exprime en watts (symbole : W).

A la limite de fonctionnement nous avons :

$$\mathcal{P}_{\max} = U_{\max} \cdot I_{\max}.$$

La loi d'Ohm permet d'écrire :

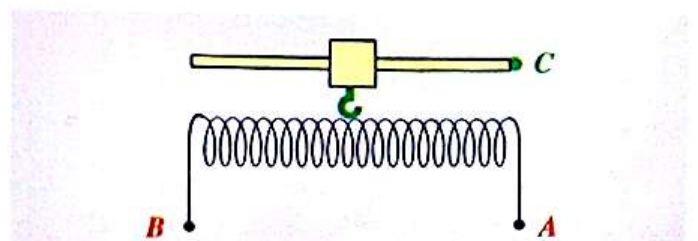
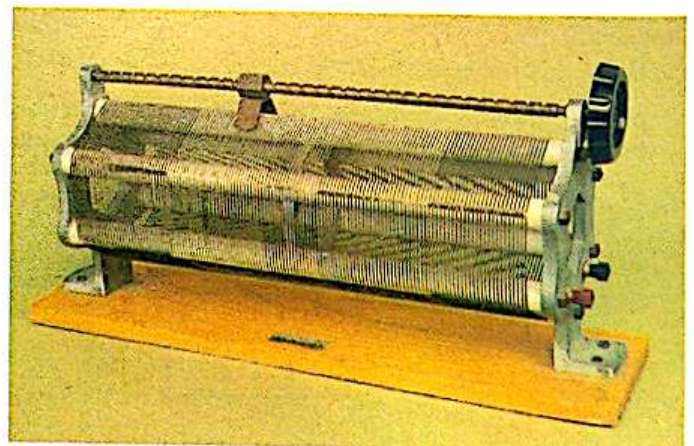
$$U_{\max} = R \cdot I_{\max}.$$

De ces deux relations on tire :

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{\mathcal{P}_{\max}}{R}} \quad \text{et} \quad U_{\max} = \sqrt{R \cdot \mathcal{P}_{\max}}.$$

Soit avec $\mathcal{P}_{\max} = 1 \text{ W}$ et $R = 23 \Omega$:

$$I_{\max} \approx 0,21 \text{ A} \quad \text{et} \quad U_{\max} \approx 4,8 \text{ V}.$$



5. Rhéostat constitué par un fil métallique enroulé sur un support isolant.

(*) Siemens (1816-1892), ingénieur allemand.

Fiche expérimentale 2

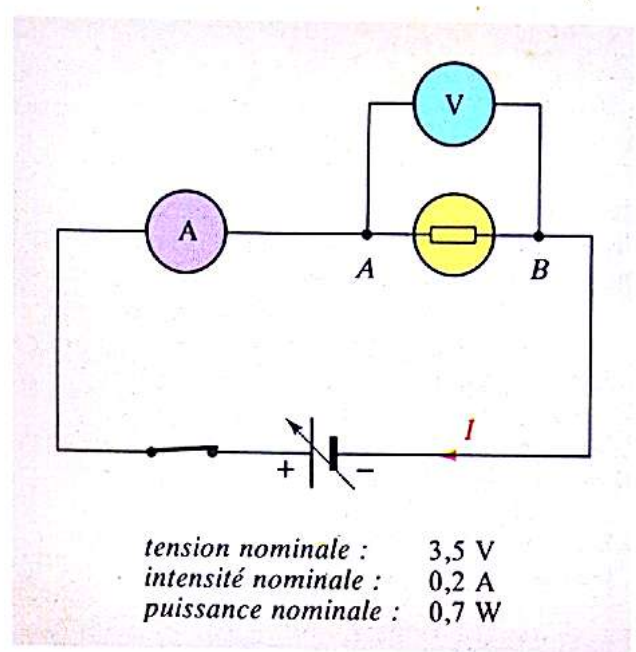
caractéristique d'une lampe

L'expérience montre que la lampe est un dipôle symétrique : sa caractéristique ne dépend pas du sens du courant.

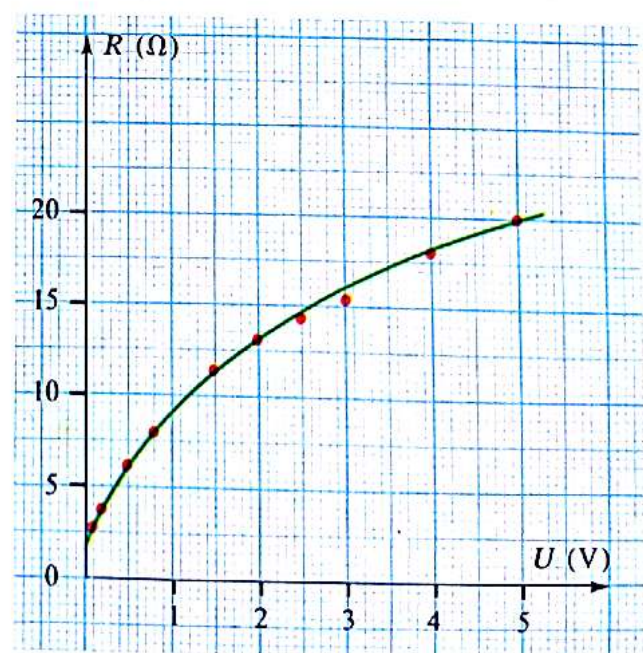
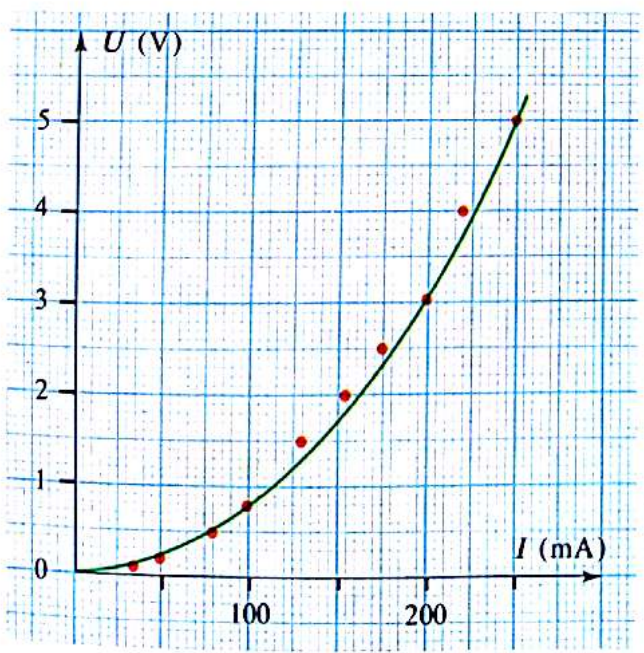
Pour relever les couples (U, I) on procède en augmentant progressivement la tension et en attendant que la température de la lampe se stabilise.

Le filament de la lampe est un fil métallique, donc un conducteur ohmique. Néanmoins on observe que la caractéristique de la lampe n'est pas une droite : le rapport $R = U/I$ (résistance de la lampe) n'est pas constant. Cela tient à ce que lorsqu'on augmente la tension U aux bornes de la lampe, et donc l'intensité qui la traverse, la température du filament croît, ce qui a pour effet d'augmenter la résistance R . La résistance d'un conducteur métallique augmente avec la température.

A chaque point de fonctionnement (U, I) correspond une température différente, et par conséquent une résistance $R = U/I$ différente.



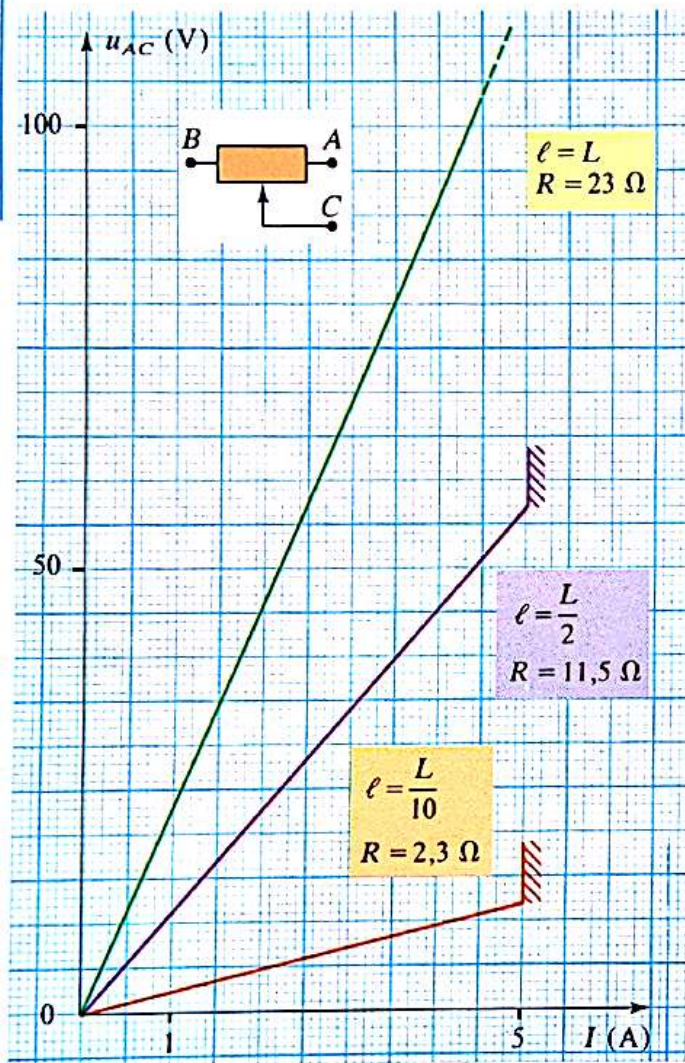
U (V)	0	0,1	0,2	0,5	0,8	1,5	2	2,5	3	4	5
I (mA)	0	36	51	81	100	132	155	175	200	222	250
U/I (Ω)		2,8	3,9	6,2	8	11,4	13	14,3	15	18	20



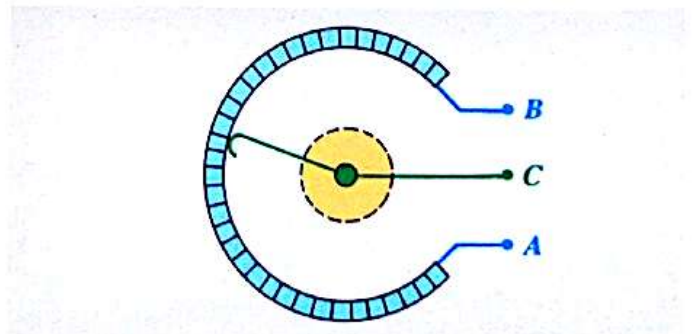
Sur la figure 6 sont représentées, pour différentes positions du curseur C , les caractéristiques du dipôle (A, C) . Nous constatons que :

- Ces caractéristiques sont linéaires et passent par l'origine : *un fil métallique est un conducteur ohmique*. Il obéit à la loi d'Ohm.
- La résistance est fonction linéaire de la longueur ℓ du fil qui se trouve entre les bornes.

Le dipôle (A, C) , conducteur ohmique de résistance ajustable, est un rhéostat.



6. Caractéristique d'un dipôle rhéostat (A, C) . Sa résistance varie avec la position du curseur; elle est fonction linéaire de la longueur ℓ de fil conducteur parcouru par le courant. Le constructeur donne : rhéostat $(23 \Omega; 7 \text{ A})$. 23Ω est la résistance maximale du rhéostat, 7 A l'intensité maximale à ne pas dépasser. Ci-dessus, on s'est limité à 5 A .



7. Rhéostat type radio. On notera le grand nombre d'enroulements du fil métallique.

Application 4 : Résistance d'un fil métallique

La résistance (en Ω) d'un fil métallique est donnée par la formule :

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{s}$$

ℓ est la longueur du fil (en m), s sa section (en m^2) et le facteur de proportionnalité ρ est appelé résistivité du conducteur; il varie avec la nature du métal qui constitue le conducteur et avec la température. Il s'exprime en ohms-mètres ($\Omega \cdot \text{m}$). L'inverse de la résistivité, $\gamma = 1/\rho$, est appelée conductivité et s'exprime en siemens par mètre ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$).

Le rhéostat (23Ω ; 7 A) de l'étude précédente est constitué par un fil de maillechort de résistivité $\rho = 30 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ et de section $s = 1 \text{ mm}^2$.

Calculer la longueur L du fil métallique (A, B).

La longueur se calcule avec la relation donnée dans l'énoncé :

$$L = \frac{R_{AB} \cdot s}{\rho}$$

Attention aux unités pour l'application numérique!

$$L = \frac{23 \cdot 10^{-6}}{30 \cdot 10^{-8}} \approx 77 \text{ m.}$$

Notons enfin que la résistance R_{AC} du rhéostat est bien fonction linéaire de la longueur ℓ de fil compris entre la borne A et le curseur C, puisque ρ et s sont des grandeurs constantes :

$$R_{AC} = \rho \cdot \ell / s = k \cdot \ell.$$

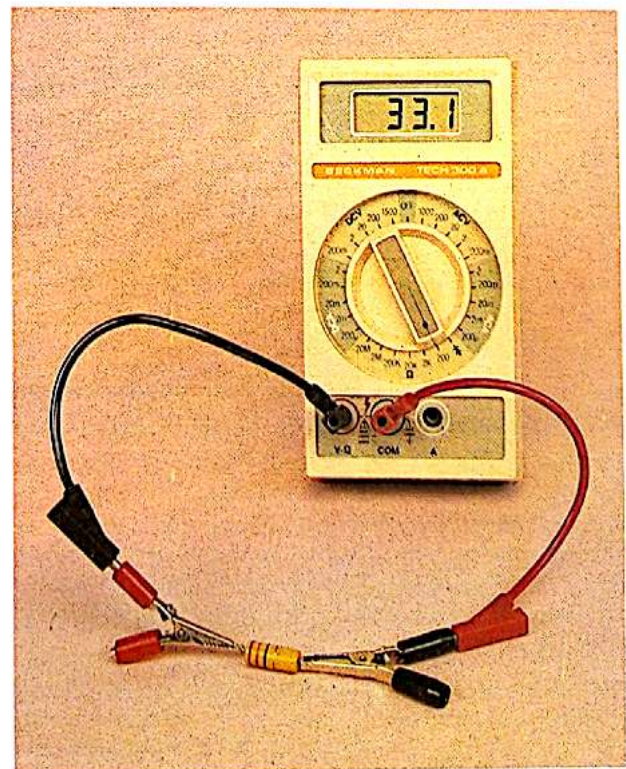
Fiche technique**ohmmètre**

Un multimètre, utilisé en *ohmmètre*, permet de déterminer rapidement la valeur de la résistance d'un conducteur ohmique.

Pour cela :

- Placer le sélecteur sur un des calibres correspondant à la fonction ohmmètre et notée Ω (calibre 200Ω dans le cas de la photographie).
- Brancher entre la borne COM et la borne V- Ω les deux bornes du conducteur ohmique.
- L'appareil affiche la valeur en ohms de la résistance ($33,1 \Omega$ dans le cas de la photographie).
- Si la valeur R à mesurer dépasse 200Ω , l'appareil affiche OL. Changer alors de calibre.

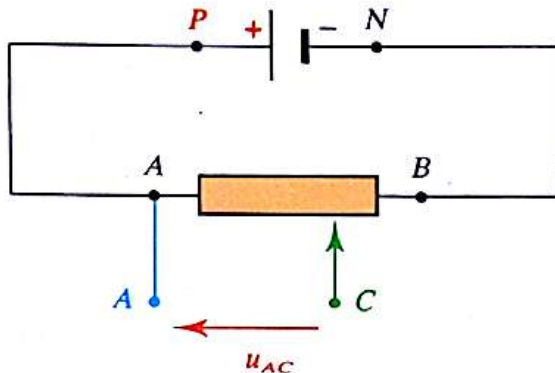
Un ohmmètre permet notamment de vérifier s'il y a un court-circuit dans un montage ($R = 0$). Avec le sélecteur sur la position $\rightarrow \leftarrow$, il permet de plus de déterminer le sens passant des diodes (voir chapitre 10).



Application 5 :

Un rhéostat peut servir de diviseur de tension (potentiomètre). Pour cela on branche aux bornes A et B du rhéostat un accumulateur maintenant entre ses bornes une tension constante $u_{PN} = 6 \text{ V}$, par exemple (fig. 8). Le circuit est ouvert entre les bornes A et C.

Montrer que la tension u_{AC} qui apparaît entre les bornes A et C peut varier continûment entre deux limites que l'on donnera. Quelle est la valeur de u_{AC} lorsque C est au milieu de A et B ?



8. Montage diviseur de tension.

On peut écrire successivement, en se référant à l'application 4 :

$$u_{AB} = u_{PN} = R_{AB} \cdot I$$

$$u_{AB} = \rho \cdot \frac{L}{S} \cdot I \quad (1)$$

$$u_{AC} = R_{AC} \cdot I$$

$$u_{AC} = \rho \cdot \frac{\ell}{S} \cdot I \quad (2)$$

L'intensité I est indépendante de la position du curseur C puisque le circuit est ouvert entre A et C.

Le rapport $\frac{(2)}{(1)}$ donne :

$$\frac{u_{AC}}{u_{PN}} = \frac{\ell}{L} \Rightarrow u_{AC} = \frac{\ell}{L} \cdot u_{PN} = \alpha \cdot u_{PN},$$

avec $0 \leq \alpha \leq 1$.

Numériquement : $u_{AC} = \alpha \cdot 6 \text{ V}$; u_{AC} varie donc de 0 à 6 volts.

Si C est au milieu de (A, B), $\ell = L/2$ et $\alpha = 0,5$; donc $u_{AC} = 3 \text{ V}$.

Le dipôle (A, C) constitue ainsi un diviseur de tension; il permet de disposer d'une tension u_{AC} qui est une fraction réglable de la tension totale u_{PN} .

Compléments mathématiques*applications linéaires*

Soit m un nombre réel donné; l'application f :

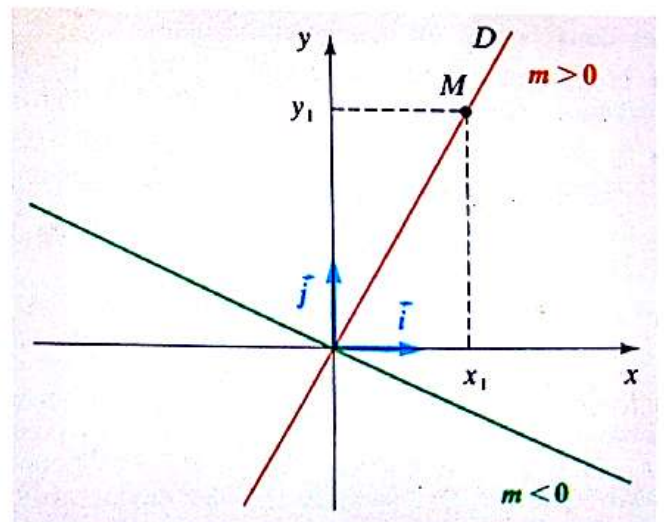
$$\begin{aligned} \mathbb{R} &\longmapsto \mathbb{R} \\ x &\longmapsto y = mx \end{aligned}$$

est appelée *application linéaire* de coefficient m . La représentation graphique de cette application dans un repère (O, \vec{i}, \vec{j}) est une droite D contenant l'origine O , et de vecteur directeur $\vec{u}(1, m)$.

m est appelée *coefficient directeur* de la droite; si m est positif, la droite « monte » (application strictement croissante); si m est négatif, la droite « descend » (application strictement décroissante).

Pour trouver m , il suffit de connaître les coordonnées d'un seul point de D : $M_0(x_0, y_0)$; il vient :

$$m = \frac{y_0}{x_0}.$$



Technologie des «résistances»

Les conducteurs ohmiques utilisés en électronique se classent essentiellement en deux catégories : les *résistances au carbone* et les *résistances métalliques*.

Résistances au carbone

Elles se divisent comme suit :

- les *résistances agglomérées* constituées d'un mélange de carbone (substance conductrice), de matière isolante et d'un liant. Tous ces constituants réduits en poudre sont agglomérés à chaud et isolés dans un tube de plastique ou de céramique. Peu coûteuses et robustes, elles sont peu précises;
- les *résistances à couche* de carbone obtenues en déposant une très mince couche de carbone sur un bâtonnet de céramique. Les extrémités du bâtonnet sont métallisées et le conducteur ohmique est protégé par un vernis ou un revêtement moulé.

Résistances métalliques

Elles se divisent elles aussi en deux familles :

- les *résistances bobinées* de puissance, constituées par un fil d'alliage (nichrome ou constantan) bobiné sur un support de céramique et moulé dans de l'émail. Elles permettent de réaliser des résistances étalons ou des résistances de puissance pouvant absorber jusqu'à 1 kW;
- les *résistances non bobinées*, obtenues par pulvérisation d'oxydes métalliques sur un tube de verre ou de céramique, ou par dépôt d'une couche très mince de métaux nobles. Ce sont des résistances de haute stabilité et de très bonne précision.

L'électrocution

Intensité et effets physiologiques

Un courant électrique qui traverse le corps humain provoque différents effets suivant son intensité :

- 1 à 5 mA : aucun danger;
- 10 à 20 mA : picotements, crispation des muscles, réactions incontrôlées;
- 25 à 30 mA : tétanisation des muscles, cage thoracique bloquée (risque d'asphyxie);
- 50 mA et au-dessus : fibrillation et arrêt du cœur; mort sauf intervention immédiate.

Résistance du corps humain

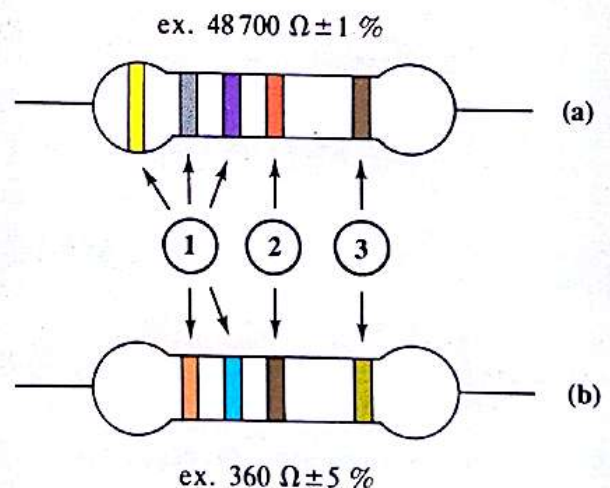
La résistance du corps humain peut varier d'une valeur de l'ordre de 50 000 Ω (peau sèche) à environ 1 000 Ω (peau humide...). On peut donc en déduire le seuil des tensions dangereuses.

Plaçons-nous dans le cas le plus défavorable : $R = 1\,000\ \Omega$ et $I = 50\ \text{mA}$. Il vient : $U = 1\,000 \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 50\ \text{V}$.

Les tensions de 220 V, 380 V peuvent donc entraîner la mort. Pour des raisons de sécurité, le seuil a été fixé légalement à 24 V. On a aussi constaté que la durée de passage du courant intervient dans les risques d'accidents. Ainsi un contact de durée inférieure au dixième de seconde avec une tension de 220 V est en principe sans danger mortel.

Marquage des résistances			
	1, 2, 3 chiffres significatifs	multiplicateur	tolérance \pm
N° sur ex.	①	②	③
	0	1	20 %
	1	10^1	1 %
	2	10^2	2 %
	3	10^3	
	4	10^4	
	5	10^5	
	6	10^6	
	7		
	8		
	9		
		10^{-2}	10 %
		10^{-1}	5 %

Code international des couleurs pour le marquage des résistances



La tolérance est le taux d'incertitude $\Delta R/R$ sur la valeur de la résistance. L'incertitude ΔR représente la différence maximale entre la résistance réelle et la valeur indiquée par le code des couleurs. Sur les résistors courants (b) deux anneaux seulement donnent les chiffres significatifs de la résistance, au lieu de trois (a) pour les résistors de grande précision (faible tolérance).

Faire le point

- Énoncer la loi d'Ohm.
- Quelle relation lie la conductance et la résistance d'un conducteur ohmique?
- Donner les unités de résistance et de conductance.
- De quels facteurs la résistance d'un conducteur métallique dépend-elle essentiellement?
- Schématiser un montage permettant de tracer la caractéristique d'un conducteur ohmique.

6.1 Voici quelques affirmations concernant le conducteur ohmique; répondre par vrai ou faux.

- 1/ Sa caractéristique est une droite.
- 2/ Ce dipôle n'est pas symétrique.
- 3/ Sa résistance dépend de la température.
- 4/ $u_{AB} = R \cdot i$ lorsque le courant va de B vers A.

Détermination de R ou G

6.2 La tension mesurée aux bornes d'un conducteur ohmique est $u_{AB} = 1,3$ V lorsqu'un courant d'intensité $i = 100$ mA le traverse. Calculer sa résistance R .

6.3 La tension mesurée aux bornes d'un conducteur ohmique est $u_{AB} = 200$ mV lorsqu'un courant d'intensité $i = 1,2$ mA le traverse. Calculer sa conductance G .

6.4 La photo montre le cadran d'un ohmmètre branché aux bornes d'un conducteur ohmique. Déterminer la résistance de ce conducteur.



6.5 La photo 1 de la page 56 montre plusieurs conducteurs ohmiques. D'après le code des couleurs (voir document), en déduire leur résistance.

6.6 Au cours d'une série de mesures on a relevé les couples (i, U) aux bornes d'un conducteur ohmique :

i (A)	0	0,08	0,14	0,22
U (V)	0	2	3,5	5,5

- 1/ Tracer la caractéristique intensité-tension.
- 2/ Quelle est l'équation de la droite représentant cette caractéristique? Quel est son coefficient directeur?

3/ En déduire la résistance R de ce conducteur ohmique.

6.7 A la suite de mesures de l'intensité et de la tension aux bornes d'un dipôle symétrique, on a relevé les couples de valeurs suivants :

i (A)	0	0,23	0,51	1,06	1,43
U (V)	0	1	2,2	4,6	6,2

1/ Tracer la caractéristique tension-intensité de ce dipôle.

2/ Peut-on conclure que ce dipôle est un conducteur ohmique? Calculer alors sa conductance.

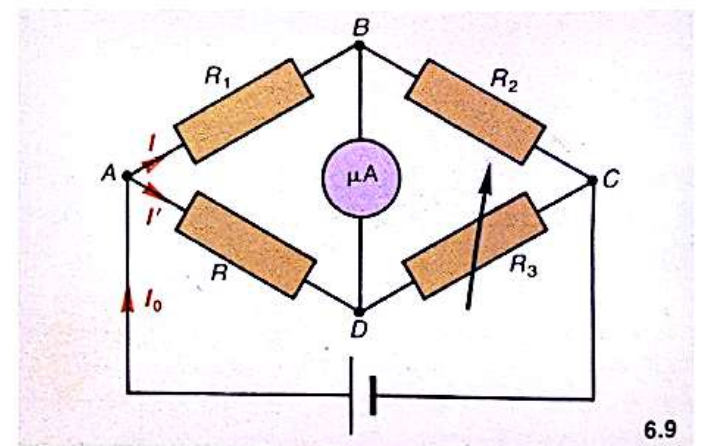
6.8 L'équation de la caractéristique d'un dipôle symétrique (A, B) est : $u_{AB} = 2 \cdot i$ (u_{AB} en volts, i en ampères).

1/ Quelle est la nature de ce dipôle? Quelle est sa résistance? Quelle est sa conductance?

2/ Tracer sa caractéristique intensité-tension : $u_{AB} = f(i)$, le dipôle étant orienté de A vers B.

3/ Reprendre la question précédente, le dipôle étant orienté de B vers A.

6.9 Une mesure précise de résistance peut être réalisée en utilisant le montage ci-dessous, connu sous le nom de *pont de Wheatstone*. Lorsque le pont est « équilibré », il ne passe aucun courant dans la branche médiane BD , et l'aiguille du microampèremètre ne dévie pas.



1/ Dans quelle condition l'équilibre est-il réalisé?

2/ R_3 est une résistance variable. On ajuste R_3 de telle façon que le microampèremètre ne dévie pas. Le pont est alors équilibré. Calculer R pour $R_1/R_2 = 0,01$ et $R_3 = 238 \Omega$.

Prédétermination de points de fonctionnement

6.10 Un conducteur ohmique de résistance $R = 18 \Omega$ présente une tension de 12 V à ses bornes.

- 1/ Calculer l'intensité i du courant qui le traverse.

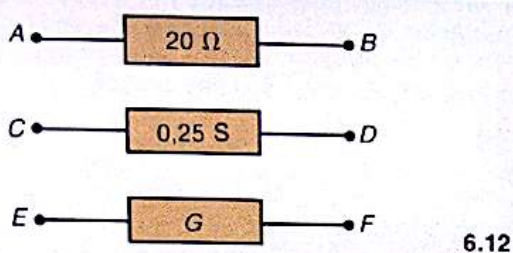
2/ Il est maintenant parcouru par un courant d'intensité 40 mA. Quelle est la tension à ses bornes?

6.11 La conductance G d'un conducteur ohmique est de 1,2 S.

1/ On applique à ses bornes une tension de 0,6 V. Calculer l'intensité du courant qui le traverse.

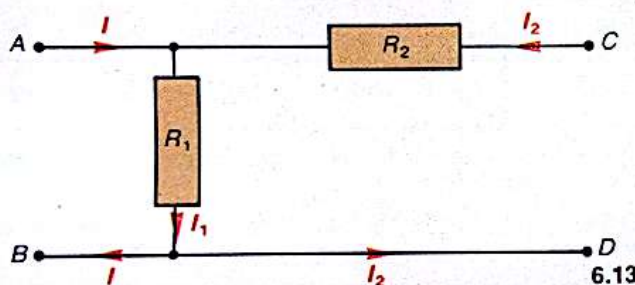
2/ Il est maintenant parcouru par un courant d'intensité 120 mA. Quelle est la tension à ses bornes?

6.12 Soient trois conducteurs ohmiques schématisés ci-dessous.



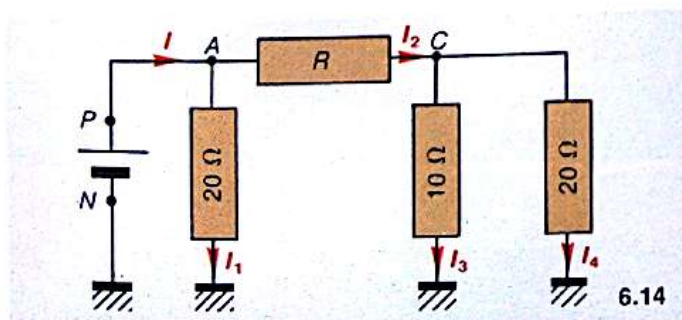
- 1/ Si $I = 20$ mA, calculer u_{BA} .
- 2/ Si $u_{DC} = 5$ V, calculer I .
- 3/ Si $u_{EF} = 15$ V et $I = 200$ mA, calculer la conductance et la résistance du dipôle (E, F).

6.13 On considère le montage schématisé ci-dessous. On applique aux bornes (A, B) une tension $u_{AB} = 1$ V et aux bornes (C, D) une tension $u_{CD} = 0,5$ V.



Déterminer les intensités I , I_1 et I_2 des courants dans les différentes branches. R_1 et R_2 sont des conducteurs ohmiques de résistances respectivement égales à 0,5 k Ω et 1 k Ω . Préciser le sens des courants.

6.14 On considère un réseau électrique alimenté par une batterie d'accumulateurs délivrant une tension $u_{PN} = 12$ V. Les dipôles sont des conducteurs ohmiques. Sachant que $u_{AC} = 4$ V, calculer l'intensité du courant dans chaque branche. Préciser le sens de ces courants. Calculer la résistance R . On admet que la chute de tension aux extrémités des fils de jonction est nulle.

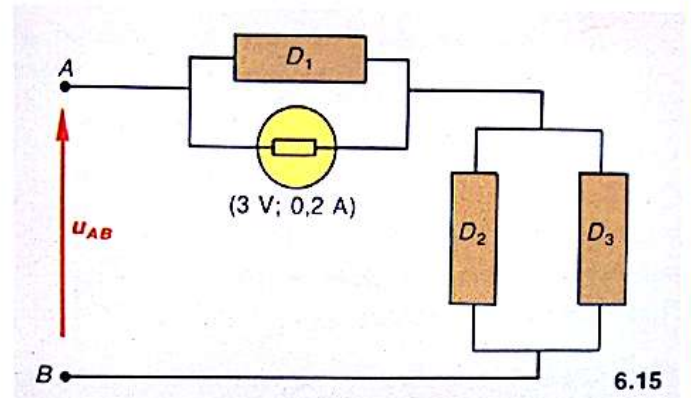


6.15 On a réalisé le montage schématisé sur la figure ci-dessous.

La tension u_{AB} appliquée est de 9 V; les dipôles D_1 et D_2 sont des conducteurs ohmiques identiques de résistance $R = 18 \Omega$.

La résistance R_3 du conducteur ohmique D_3 est inconnue.

La lampe (3 V; 0,2 A) fonctionne normalement.



- 1/ Calculer l'intensité qui circule dans D_1 .
- 2/ Calculer la tension aux bornes de D_2 et D_3 et les intensités qui circulent dans ces deux dipôles.
- 3/ En déduire la valeur de la résistance R_3 .
- 4/ La lampe vient à griller; la tension u_{AB} reste constante. L'intensité dans le circuit principale augmente-t-elle ou diminue-t-elle?

Puissance Point de fonctionnement limite

6.16 Lorsqu'un dipôle récepteur est parcouru par un courant I et soumis à une tension u , la puissance électrique dépensée dans ce dipôle est $\mathcal{P} = u \cdot I$. \mathcal{P} s'exprime en watts (W) dans le système international d'unités.

1/ Calculer la puissance dépensée dans un conducteur ohmique de résistance $R = 24 \Omega$, soumis à une tension de 6 volts.

2/ Calculer la puissance dépensée dans un conducteur ohmique de conductance $G = 0,2$ S parcouru par une intensité de 6 A.

On suppose que résistance et conductance varient peu avec la température.

6.17 Un fusible assimilable à un conducteur ohmique de résistance $R = 44 \Omega$ est détruit lorsque la puissance électrique dépensée dépasse 4,4 kW. Calculer l'intensité maximale du courant qui provoque sa destruction en admettant que sa résistance varie très peu avec la température.

6.18 On considère trois conducteurs ohmiques de résistances respectives 12 Ω , 47 Ω et 120 Ω . Soit $\mathcal{P}_{\max} = 2$ W la puissance maximale que peut recevoir chacun d'eux. On suppose que leur résistance varie peu avec la température.

1/ En portant I en abscisses et U en ordonnées, représenter la courbe (\mathcal{P}) représentative des couples (I_{\max} , U_{\max}) obéissant à la relation :

$$\mathcal{P}_{\max} = U_{\max} \cdot I_{\max}$$

Échelles : 1 cm \leftrightarrow 0,05 A; 1 cm \leftrightarrow 2 V.

2/ Tracer sur le même graphique les caractéristiques des trois conducteurs ohmiques et déterminer les points de fonctionnement limites de ces dipôles.

3/ A partir des relations $U = R \cdot I$ et $\mathcal{P} = U \cdot I$, retrouver ces valeurs par le calcul. On supposera que R ne varie pas avec la température.

Résistance d'un fil métallique Résistivité

6.19 La résistance d'un conducteur dépend de sa forme géométrique. La résistance d'un fil homogène cylindrique, de section d'aire constante s et de longueur ℓ , est reliée à ces grandeurs par la formule :

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{s}$$

ρ s'appelle la résistivité du matériau. Elle ne dépend que de la nature du corps et de la température.

1/ Peut-on trouver l'unité de mesure de la résistivité dans le système international d'unités?

2/ Calculer la résistance pour un fil métallique de longueur 2 m, de diamètre 1 mm, à 0 °C. A cette température on donne :

$$\rho_{\text{cuivre}} = 1,6 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}; \quad \rho_{\text{argent}} = 1,5 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m};$$

$$\rho_{\text{maillachort}} = 30 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}; \quad \rho_{\text{nichrome}} = 110 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}.$$

Faire le calcul pour deux métaux différents.

3/ Le diamètre du fil est 10 fois plus petit, sa longueur identique. Comparer les deux résistances. Quelle conclusion peut-on en tirer pour obtenir une résistance élevée? Pourquoi ne peut-on pas choisir des fils trop fins?

6.20 On veut réaliser un réchaud électrique dissipant une puissance de 600 W et alimenté sous une tension de 220 V (on fera les calculs comme en courant continu).

1/ Quelle est l'intensité du courant qui traverse le réchaud?

2/ Quelle sera à chaud la résistance du fil chauffant?

3/ Pour réaliser cette résistance chauffante, on bobine, dans une cannelure taillée dans un support réfractaire, un fil de longueur 12 m. A la température de fonctionnement, la résistivité ρ du fil est égale à $1,2 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$. Quel doit être le diamètre du fil chauffant?

Variation de R avec la température

6.21 On a relevé ci-après quelques points de fonctionnement d'une lampe à incandescence à filament de tungstène, normalement utilisée sous une tension de 6 V.

U (V)	0,05	0,1	0,3	0,4	0,6	0,8
I (mA)	25	50	100	111	129	148

U (V)	2	3	4	5	6	7
I (mA)	240	295	345	395	435	475

1/ Tracer la caractéristique intensité-tension.

2/ Déterminer, pour chaque point de fonctionnement, la résistance $R = U/I$ de la lampe. Représenter graphiquement la relation $R = f(I)$. Que peut-on dire de la variation de la résistance du filament avec la température?

6.22 Aux bornes d'un dipôle (A , B) symétrique, on a relevé le tableau des points de fonctionnement ci-après. Le calibre du voltmètre utilisé est 300 V; le cadran comporte 150 divisions.

I (mA)	5	10	20	30	40
U_{AB} (V)					
div.	10	19	34,5	48	62

I (mA)	50	60	70	80	90
U_{AB} (V)					
div.	74,5	86,5	97,5	108	119

1/ Faire un schéma du montage. Compléter le tableau en exprimant U_{AB} en volts.

2/ Tracer la caractéristique avec I en ordonnées et U_{AB} en abscisses.

3/ Le dipôle (A , B) est une lampe à filament de carbone. Calculer pour chaque point de fonctionnement la résistance $R = U_{AB}/I$, puis tracer le graphique représentant R en fonction de I . La résistance de cette lampe est-elle fonction croissante ou décroissante de la température?

4/ Comparer ces résultats avec ceux obtenus pour une lampe à filament de tungstène à l'exercice 6.21. En tirer des conclusions quant aux modes de conduction.

6.23 Soit un dipôle récepteur (A , B). On utilise le montage classique pour relever la tension aux bornes et pour mesurer l'intensité qui traverse ce dipôle. On a relevé dans un tableau les indications lues sur le voltmètre et l'ampèremètre.

U_{AB} (V)	2,4	2,6	2,8	3	3,2
I (mA)	0,8	2,4	6,4	15,5	26

U_{AB} (V)	3,3	3,4	3,5	3,6	3,8
I (mA)	41,1	56,1	71,2	83,2	1

1/ Tracer la caractéristique avec u_{AB} en abscisses et I en ordonnées.

2/ Déterminer, pour la partie linéarisable de la caractéristique, une relation affine du type :

$$I = a \cdot u_{AB} + b.$$

On précisera les unités pour a et b .

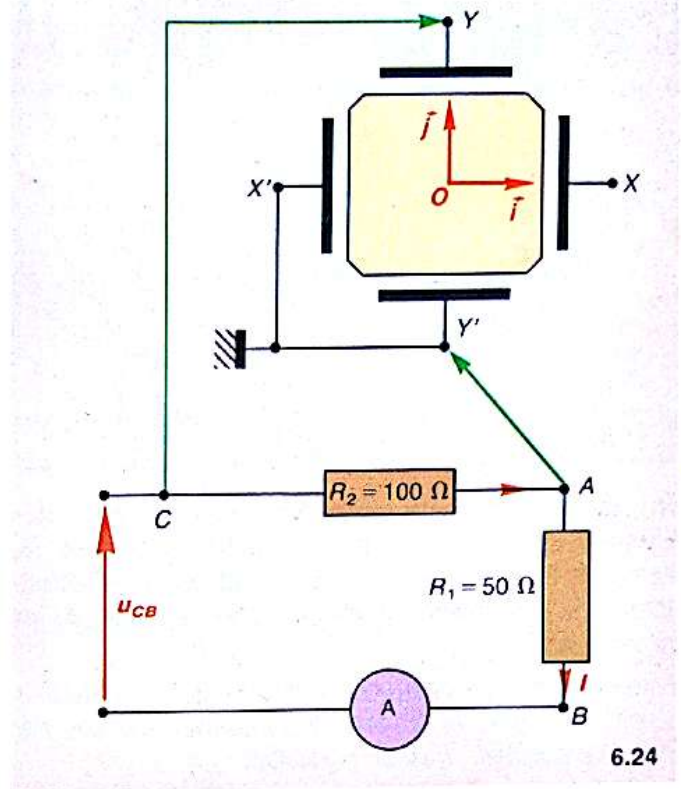
6.24 On réalise le circuit série schématisé ci-contre. Les bornes des conducteurs ohmiques sont reliées à un oscillographe, comme l'indique la figure. L'écran de l'oscillographe est quadrillé : 10 divisions horizontales et 10 divisions verticales. Déviations horizontale et verticale de l'oscillographe sont réglées sur la sensibilité 1 V/division. Le spot est initialement au centre O de l'écran.

1/ Représenter les caractéristiques de chacun des conducteurs ohmiques.

2/ Représenter l'écran sur papier millimétré; tracer le repère (O, \vec{i}, \vec{j}) . Déterminer les coordonnées du spot et représenter sa position sur le schéma lorsque l'intensité

- allant de C vers A vaut : 0 mA; 20 mA; 50 mA;
- allant de A vers C vaut : 0 mA; 20 mA; 50 mA.

3/ Représenter la trajectoire décrite par le spot lorsque la tension u_{CB} varie de $-7,5$ V à $+7,5$ V. Sachant que $I = u_{CA}/R_2$, graduer l'axe vertical en mA. Que représente la trajectoire décrite par le spot?



6.24

7.

Caractéristique d'une pile

7.1 la pile, dipôle actif

Une pile est un dipôle qui possède deux bornes différenciées : la borne positive P et la borne négative N . Même en l'absence de courant (circuit ouvert), il existe une tension u_{PN} (positive) entre ses bornes : une pile est un dipôle actif.

Inserée dans un circuit ne contenant que des dipôles passifs, une pile est à l'origine du courant qui sort par sa borne positive : c'est un générateur.

L'expérience montre que la tension u_{PN} et l'intensité I du courant débité dépendent de la nature du circuit d'utilisation. En revanche la caractéristique intensité-tension $I \mapsto u_{PN}(I)$ ne dépend pas de ce circuit d'utilisation; elle ne dépend que de la pile considérée. Étudions cette caractéristique qui représente l'ensemble des états de fonctionnement d'une pile.



1. Différents types de piles.

7.2 caractéristique intensité-tension d'une pile

7.2.1 résultats expérimentaux

Pour tracer la caractéristique d'une pile, et plus généralement d'un dipôle actif, nous utilisons le montage détaillé dans la fiche expérimentale (fig. 2).

Pour un domaine limité de fonctionnement ($I < 0,5$ A), la représentation graphique de la caractéristique (fig. 3) est une portion de droite Δ de coefficient directeur négatif, qui ne passe pas par l'origine. C'est la représentation graphique d'une application affine :

$$\begin{aligned} I &\mapsto u_{PN} \\ I &\mapsto m \cdot I + p, \quad m < 0. \end{aligned}$$

Nous écrirons l'équation de la droite sous la forme :

$$u_{PN} = -r \cdot I + E \quad (1)$$

ou :

$$u_{PN} = E - r \cdot I,$$

avec $E > 0$ et $r > 0$, le courant I sortant par la borne + du générateur.

- Les piles et tous les dipôles actifs dont la caractéristique est une portion de droite sont appelées générateurs linéaires.

7.2.2 interprétation

Examinons la caractéristique de la figure 3 :

- L'ordonnée à l'origine E , qui correspond au point de fonctionnement B ($I=0, u_{PN}=E$), s'appelle force électromotrice (f.é.m.) de la pile. Elle représente la tension aux bornes de la pile lorsque cette dernière ne débite pas de courant, c'est-à-dire en circuit ouvert.
- La f.é.m. se mesure en volts. L'indication portée par le constructeur sur les piles donne l'ordre de grandeur de la force électromotrice. Par exemple, $E=4,5$ V.
- L'application affine est strictement décroissante; le coefficient directeur de la caractéristique est négatif : $(-r)<0$, et $r>0$. u_{PN} est toujours inférieure à E .

Ecrivons la relation (1) sous la forme :

$$E - u_{PN} = r \cdot I.$$

$r \cdot I$ est homogène à une tension : c'est la chute de tension aux bornes de la pile lorsque cette dernière est traversée par un courant I . Le coefficient r est donc homogène à une résistance et se mesure en ohms. r est appelé résistance interne de la pile.

Les résistances internes des piles les plus couramment employées varient de $0,5 \Omega$ à 2Ω environ.

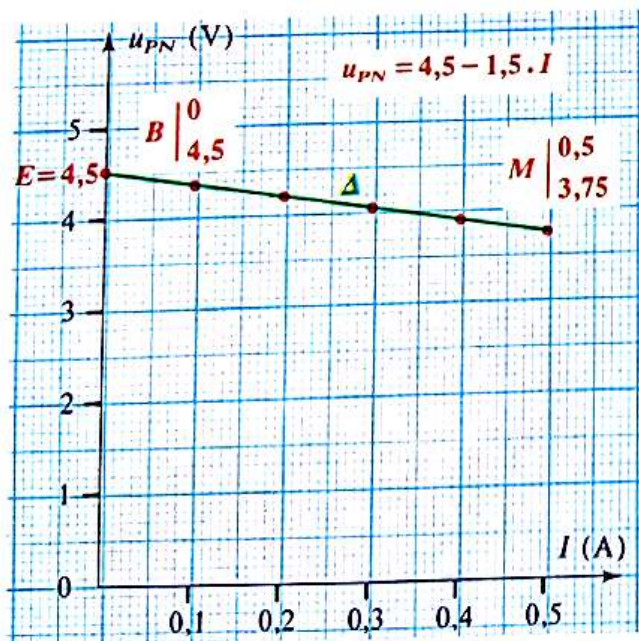
Fiche expérimentale

tracé de la caractéristique d'une pile

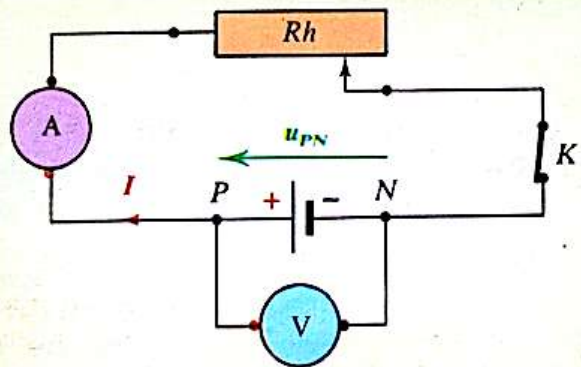
L'interrupteur K du montage ci-contre étant ouvert, relevons la tension u_{PN} : nous lisons sur le voltmètre $4,50$ V.

K fermé, faisons croître I et relevons des couples de mesures (I, u_{PN}).

Portons, dans un système d'axes u_{PN} (en ordonnées), I (en abscisses), les points représentatifs de ces couples (fig. 3).



3. Une pile est un générateur linéaire.



2. Montage d'étude de la caractéristique d'une pile.

Les points représentatifs sont alignés; la caractéristique Δ est une droite d'équation :

$$u_{PN} = E - r \cdot I.$$

Déterminons E et r (voir page 73 compléments mathématiques) :

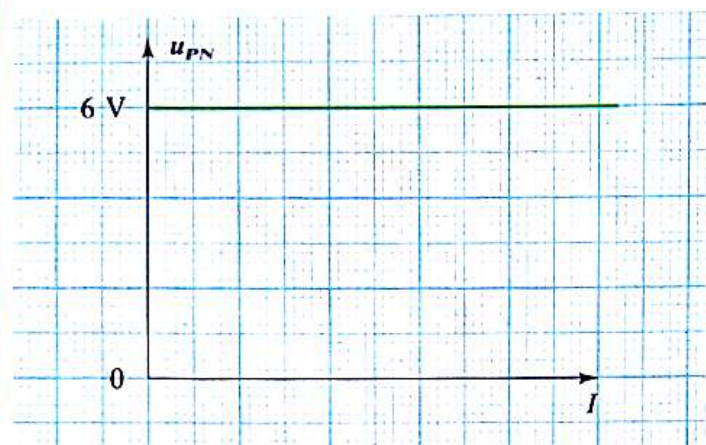
- $I=0, u_{PN}=E=4,50$ V.
- $(-r)$ est le coefficient directeur; utilisons les points M et B (fig. 3) pour le calculer :

$$(-r) = \frac{3,75 - 4,50}{0,50 - 0} = -1,5 \implies r = 1,5 \Omega.$$

L'équation de la caractéristique Δ s'écrit donc :

$$u_{PN} = 4,5 - 1,5 \cdot I.$$

Remarque : Il existe d'autres générateurs dont la caractéristique est linéaire sur certains domaines de fonctionnement. Citons l'*accumulateur* dont la caractéristique est une droite quasi parallèle à l'axe des intensités (fig. 4). Sa résistance interne est très faible, de quelques centièmes d'ohms; un accumulateur maintient donc, lorsqu'il débite un courant, une tension pratiquement constante entre ses bornes, égale à sa f.é.m.



4. Caractéristique d'un accumulateur. Un tel générateur maintient entre ses bornes une tension constante, quelle que soit l'intensité débitée. Il ne faut jamais mettre un accumulateur en court-circuit, l'intensité correspondante étant très grande.

Application 1 :

Montrer que l'équation de la caractéristique tension-intensité d'un générateur linéaire peut se mettre sous la forme :

$$I = I_{CC} - g \cdot u.$$

L'équation de la caractéristique intensité-tension est de la forme :

$$u = E - r \cdot I, \quad \text{soit} \quad I = \frac{E}{r} - \frac{u}{r}.$$

E/r correspond à l'intensité de court-circuit I_{CC} ($u = 0$).

Posons $g = \frac{1}{r}$ (conductance interne); ainsi :

$$I = I_{CC} - g \cdot u.$$

Application 2 :

Considérons la pile et le montage de la figure 2 précédemment étudiés. Quelle est la puissance délivrée par la pile au rhéostat lorsque $I = 0,5$ A ?

Nous savons (cours de la classe de Quatrième) que la puissance consommée par le dipôle passif qu'est le rhéostat est :

$$\mathcal{P} = U \cdot I.$$

Or la tension $U = u_{AC}$ (fig. 2) aux bornes du rhéostat est égale à celle aux bornes de la pile :

$$u_{AC} = u_{PN}.$$

Pour $I = 0,5$ A, $u_{PN} = 3,75$ V, et l'on a donc :

$$\mathcal{P} = 3,75 \times 0,5 \approx 1,9 \text{ watts.}$$

7.2.3 intensité théorique de court-circuit

Le prolongement Δ de la portion de caractéristique tracée figure 5 coupe l'axe des intensités au point A de coordonnées ($I = I_{CC}$, $u_{PN} = 0$).

I_{CC} représente l'intensité théorique du courant de court-circuit qui circulerait dans un simple fil de connexion reliant les bornes P et N, en supposant que le fonctionnement de la pile reste linéaire. Il vient alors :

$$u_{PN} = 0 = E - r \cdot I_{CC},$$

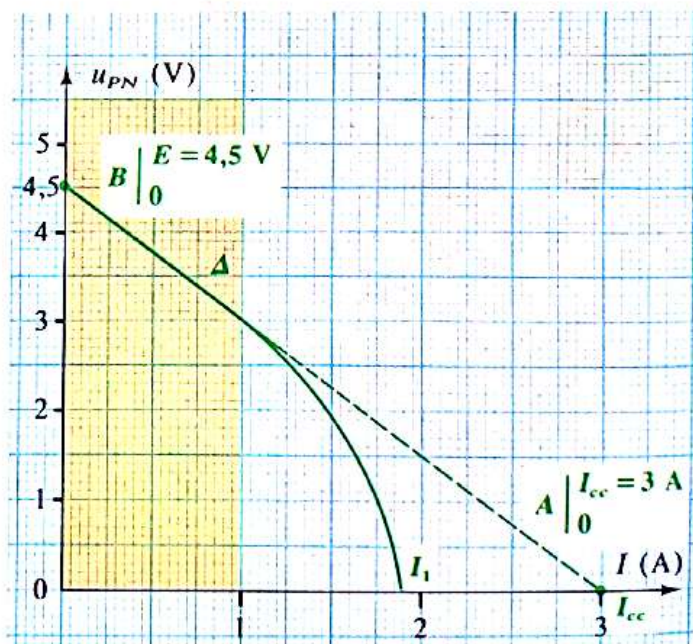
soit

$$r = \frac{E}{I_{CC}}.$$

Nous avons ainsi une seconde méthode théorique pour déterminer la résistance interne de la pile.

Pratiquement, I_{CC} ne peut être obtenu que graphiquement car il est dangereux de court-circuiter un générateur. D'autre part, dans le cas des piles usuelles, si l'intensité débitée devient trop grande, la caractéristique n'est plus linéaire : la température de la pile varie et son fonctionnement est perturbé. L'intensité réelle de court-circuit I_1 est généralement inférieure à la valeur théorique $I_{CC} = E/r$.

On ne court-circuitera donc jamais une pile avec un ampèremètre pour recherche I_{CC} .



5. Au-delà d'une certaine intensité, la caractéristique d'une pile n'est plus linéaire; le courant de court-circuit I_1 expérimental est inférieur au courant de court-circuit théorique $I_{CC} = E/r$. La partie sur fond jaune correspond au fonctionnement linéaire étudié dans la fiche expérimentale.

Application 3 :

Comparer les chutes de tension aux bornes d'une pile (4,5 V; 1,5 Ω) et d'un accumulateur (6 V; 0,02 Ω) lorsque ces générateurs débitent un courant de 1 A. Comparer les intensités théoriques de court-circuit. Conclure.

La chute de tension aux bornes de la pile est :

$$E_1 - u_{PN1} = r_1 \cdot I = 1,5 \text{ V.}$$

La chute de tension aux bornes de l'accumulateur est :

$$E_2 - u_{PN2} = r_2 \cdot I = 0,02 \text{ V.}$$

Cette dernière valeur est très faible : la tension aux bornes de l'accumulateur peut être considérée comme pratiquement indépendante de l'intensité du courant débité.

Comparons les intensités de court-circuit :

- pour la pile :

$$I_{CC1} = \frac{E_1}{r_1} = \frac{4,5}{1,5} = 3 \text{ A ;}$$

- pour l'accumulateur :

$$I_{CC2} = \frac{E_2}{r_2} = \frac{6}{0,02} = 300 \text{ A.}$$

Un courant aussi intense est dangereux, car il produit un échauffement considérable des conducteurs qu'il traverse et peut les faire fondre; dans une automobile ou une habitation, la fusion d'un fil et de sa gaine protectrice par court-circuit peut provoquer un incendie.

Compléments mathématiques*applications affines*

La représentation graphique, dans un repère (O, \vec{i}, \vec{j}) , de l'application affine f :

$$\begin{aligned} \mathbb{R} &\mapsto \mathbb{R} \\ x &\mapsto y = mx + p \end{aligned}$$

est une droite Δ de vecteur directeur $\vec{u}(1, m)$, qui coupe l'axe Oy au point B d'ordonnée $y_B = p$ et l'axe Ox au point A d'abscisse $x_A = -p/m$.

Le coefficient m est appelé *coefficient directeur* de la droite Δ . Si ce coefficient est positif, la droite « monte » (application affine strictement croissante), s'il est négatif, la droite « descend ». Réciproquement, pour déterminer l'équation d'une droite Δ , plusieurs cas peuvent se présenter :

- On connaît les coordonnées des points A et B ;

$$p = y_B \quad \text{et} \quad m = -\frac{p}{x_A}.$$

- On connaît $B(0, y_B)$ et les coordonnées d'un autre point M de la droite (x_M, y_M) :

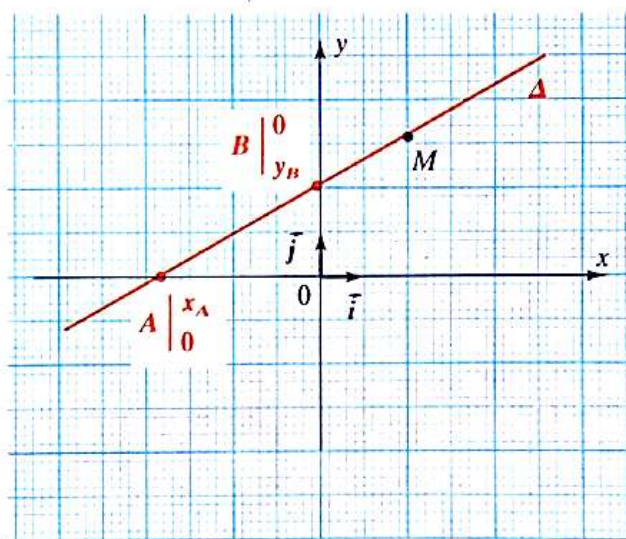
$$\begin{cases} p = y_B \\ y_M = mx_M + p \end{cases} \implies m = \frac{y_M - y_B}{x_M}.$$

- On connaît 2 points $M_1(x_1, y_1)$ et $M_2(x_2, y_2)$. Le vecteur $\overrightarrow{M_1M_2}$ est un vecteur directeur de la droite :

$$\vec{u} [(x_2 - x_1), (y_2 - y_1)].$$

Soit $M(x, y)$ un point quelconque de la droite Δ ; le vecteur $\overrightarrow{M_1M}$ est un autre vecteur directeur :

$$\vec{v} [(x - x_1), (y - y_1)].$$



\vec{u} et \vec{v} sont colinéaires, et leur déterminant est nul; d'où l'équation :

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & x_2 - x_1 \\ y - y_1 & y_2 - y_1 \end{vmatrix} = 0$$

soit : $(x - x_1)(y_2 - y_1) - (x_2 - x_1)(y - y_1) = 0$.

Remarquons que le coefficient directeur est donné par :

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}.$$

On peut donc connaître directement m .

Quelques types de générateurs de courant continu

1 Les générateurs électrochimiques

Piles électriques, accumulateurs, piles à combustibles appartiennent à la famille des générateurs électrochimiques. Ils fournissent de l'électricité à partir de réactions chimiques se produisant sur deux électrodes plongées dans un électrolyte. Les deux électrodes, qui constituent les deux bornes du générateur, doivent être de natures différentes. La chaîne conductrice : borne \oplus , électrolyte, borne \ominus est donc dissymétrique.

Les piles fournissent leur énergie sans avoir la possibilité de revenir à leur état initial; elles diffèrent en cela des accumulateurs qui, après décharge, subissent les réactions chimiques inverses si on leur fournit de l'énergie électrique (recharge).

Actuellement, les fabricants classent les piles en plusieurs catégories :

- **piles salines.** Type Leclanché, comprenant la chaîne conductrice (fig. 6) : carbone, dioxyde de manganèse + noir d'acétylène, chlorure d'ammonium, zinc. La borne \oplus est le carbone et la borne \ominus le zinc. C'est la pile la plus répandue dans le monde. Pour un élément de f.é.m. 1,5 V, on note : f.é.m. peu stable au cours de la décharge, durée moyenne 11 h pour un débit de 200 mA. Ces piles sont bon marché;

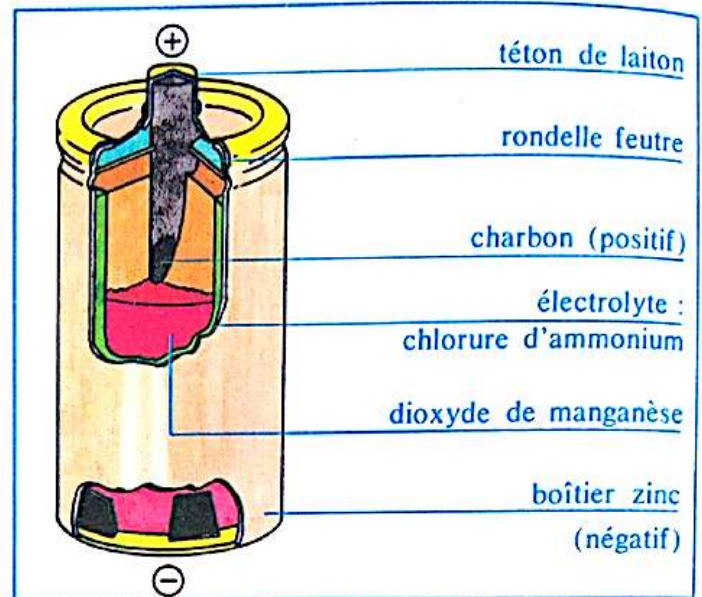
- **piles alcalines.** Type Mallory ou pile alcaline au manganèse (fig. 7). A la borne \ominus , le zinc est employé sous forme de poudre amalgamée. L'électrolyte est constitué d'une solution d'hydroxyde de potassium. A la borne \oplus , le dioxyde de manganèse est comprimé avec du graphite en poudre, le tout coiffé d'un cylindre en acier. Pour un élément de f.é.m. 1,5 V, on note : bonne stabilité au cours de la décharge, quantité d'électricité disponible plus importante, durée 50 h avec un débit de 200 mA. Ces piles sont plus chères que les précédentes;

- **piles boutons** ou piles à l'oxyde de mercure II ou à l'oxyde d'argent (fig. 8). Chaîne conductrice : zinc, hydroxyde de potassium, oxyde mercurique, poudre de graphite. La stabilité de cette pile, son étanchéité, ses dimensions réduites, font que ce type de piles se prête à la miniaturisation; mais leur prix est très élevé. Elles sont un générateur de choix, dans les calculatrices, les montres, les pacemakers, les appareils auditifs, etc.;

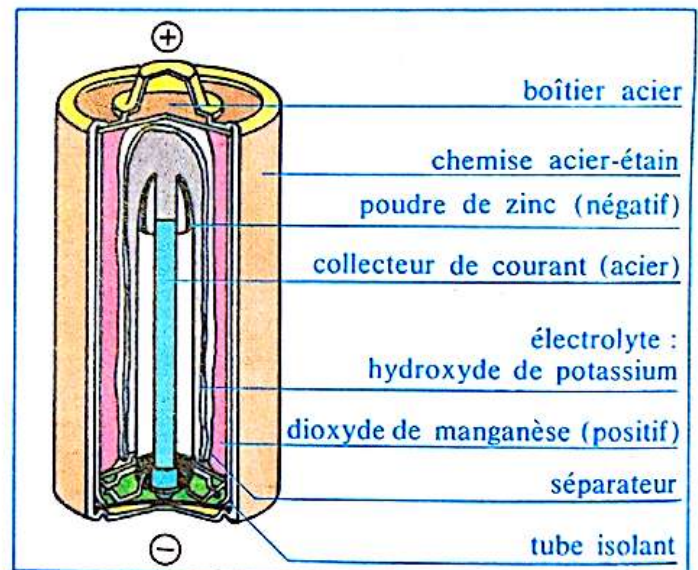
- **piles à combustibles** (hydrogène-oxygène par exemple). Leur conception est en constante évolution. Réservées encore à certaines applications (missions spatiales), leur utilisation sera bientôt courante compte tenu des rapides progrès réalisés.

Parmi les accumulateurs, l'**accumulateur au plomb** (fig. 9) reste encore le plus répandu malgré le développement d'accumulateurs plus performants et moins lourds (cadmium-nickel). La borne \oplus est une grille en plomb (ou alliage de plomb) dont les alvéoles sont remplies d'une pâte poreuse de peroxyde de plomb. La borne \ominus est une grille dont les alvéoles sont remplies d'une pâte de plomb métallique très poreux. Les séparateurs entre les grilles sont des feuilles en matière organique. L'électrolyte est une solution d'acide sulfurique de densité 1,26. Les batteries courantes sont montées dans des bacs monoblocs à 6 compartiments. Entre chaque compartiment existe une tension de 2 V.

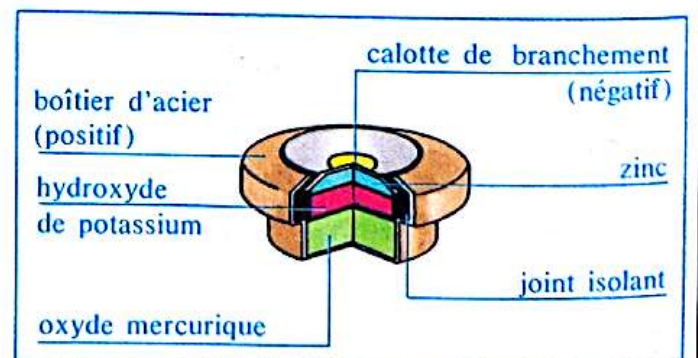
La société Peugeot, en collaboration avec SAFT, vient de mettre au point une **batterie nickel-fer** qui présente une capacité énergétique qui, à poids et volume identiques, est le double de celle des batteries au plomb. De telles batteries équiperont la 205



6. Coupe d'une pile zinc-carbone (type Leclanché).



7. Coupe d'une pile alcaline au manganèse.



8. Coupe d'une pile au mercure.

électrique (12 blocs de 6 V d'un poids total de 300 kg lui permettront d'atteindre la vitesse de 100 km/h avec une autonomie de 150 km et une durée de vie de 200 000 km).

2 Les générateurs de courant redressé

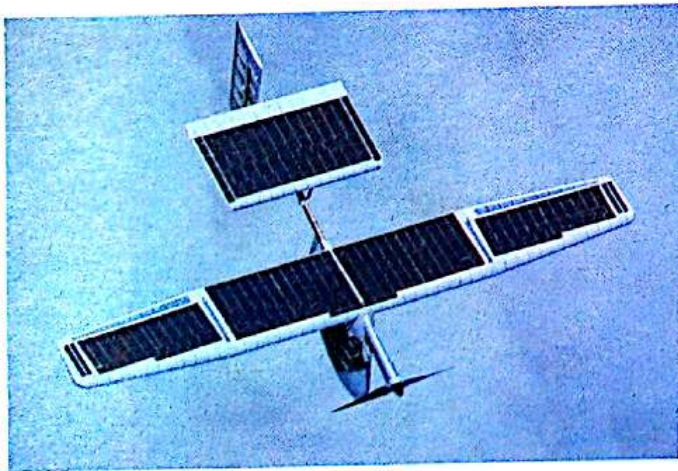
Un chargeur de batterie, les adaptateurs de calculatrices, les alimentations des laboratoires fournissent du courant continu à partir du secteur. Ils comportent un *transformateur* associé à un *redresseur* (voir document, chapitre 10). En général la caractéristique de ces appareils n'est pas rectiligne; on ne pourra pas définir simplement leur f.é.m. et leur résistance interne.

3 Les photopiles

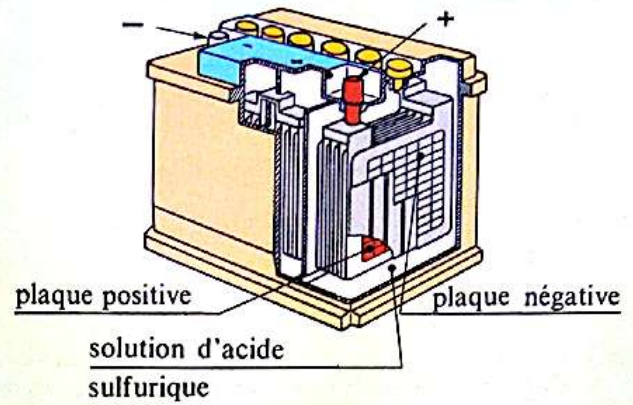
Une photopile est un dipôle qui transforme directement une partie de l'énergie lumineuse qu'il reçoit (en particulier l'énergie du Soleil, gratuite) en énergie électrique : c'est l'*effet photovoltaïque*. On désigne ainsi la faculté de certains matériaux semi-conducteurs, convenablement préparés, d'être le siège d'un déplacement d'électrons et de se comporter comme un générateur électrique, lors d'une exposition à un rayonnement lumineux (fig. 10). On leur attribue souvent le nom de *générateur solaire* ou encore de *pile solaire* ou *photopile* (appellations d'ailleurs impropres). Les plus connus de ces matériaux et les seuls commercialisés actuellement sont à base de silicium. Pour constituer un élément générateur d'électricité, ce matériau est usiné sous forme de petites plaquettes, de quelques centimètres carrés, épaisses de 200 à 300 microns. La face exposée au Soleil est généralement enrichie (ou dopée) en un autre élément, tel que le phosphore.

On recueille le courant produit en métallisant la face arrière des plaquettes et en fixant une grille métallique sur la face avant. Revêtues d'une couche antiréfléchissante, plusieurs photopiles sont regroupées sur un même module pour obtenir la puissance voulue. Une cellule fournit environ une puissance de 34 W au m². Par exemple, une cellule de 5,7 cm de diamètre peut fournir 0,7 A sous une tension de 0,4 V.

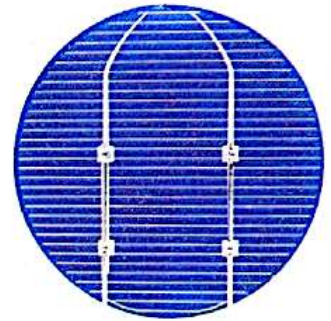
Sous-évaluées dans les années 1960, les applications furent en revanche surévaluées dans les années 1970, le principal obstacle à leur généralisation étant le coût élevé des photopiles (divisé néanmoins par 3 entre 1977 et 1983) et des installations annexes.



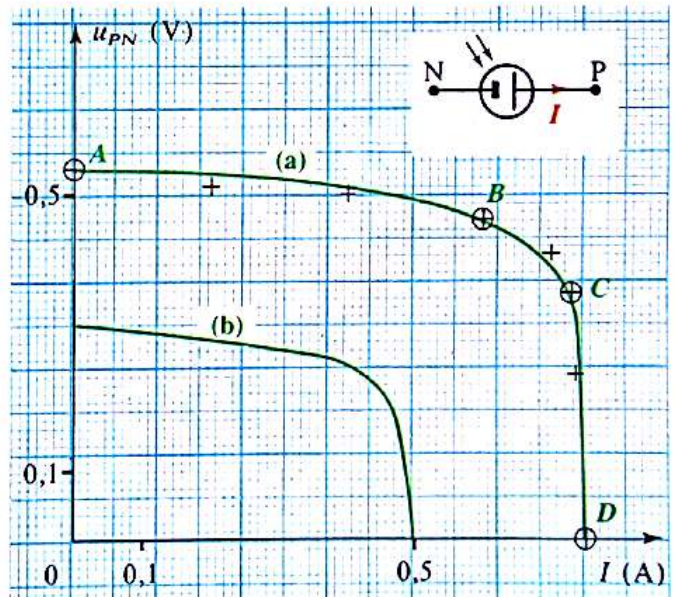
Traverser la Manche grâce à l'énergie du soleil. Le 7 juillet 1981, le «Solar Challenger» relie Cormeilles-en-Vexin à Canterbury en un peu plus de 5 heures. Les 3640 photopiles qui recouvrent les ailes de l'avion lui permettent de voler à 1500 m d'altitude. L'appareil ne pèse que 25 kg.



9. Coupe d'une batterie d'accumulateurs au plomb.



Photopile monocrystalline.



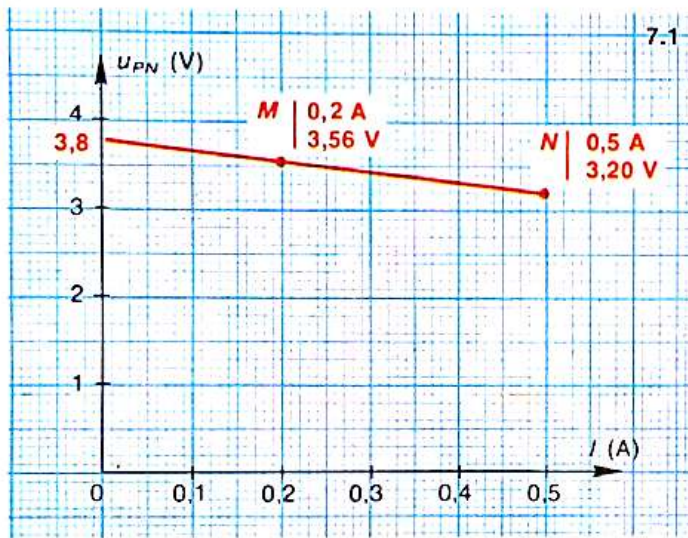
10. La caractéristique d'une photopile varie avec la lumière reçue. (a) photopile exposée au soleil; (b) photopile faiblement éclairée.

C'est dans le domaine des télécommunications que le développement est le plus spectaculaire. On envisage également de faire fonctionner ainsi des pompes assurant l'eau aux pays en voie de développement (1 500 forages sont en construction au Mali). Mais c'est aux États-Unis et au Japon que les plus ambitieux projets sont à l'étude : construction de grosses centrales de 2,5 MW, voire de 10 MW (1 MW = 10⁶ W), maisons raccordées sur le réseau, etc. Ces pays estiment que vers 2050, 20 à 30 % de l'énergie électrique mondiale sera d'origine photovoltaïque.

Faire le point

- Qu'appelle-t-on générateur linéaire?
- En quelles unités se mesurent la force électromotrice (f.é.m.) d'une pile et sa résistance interne?
- Schématiser un montage permettant de tracer la caractéristique d'une pile.
- La tension aux bornes d'une pile reste-t-elle constante lorsqu'elle débite du courant?

7.1 On a tracé ci-dessous la caractéristique d'une pile légèrement usagée. Déterminer l'équation de cette caractéristique, la f.é.m. et la résistance interne de la pile.



7.2 La caractéristique d'une pile a pour équation :
 $U_{PN} = 1,5 - 0,8 \cdot I$ (I en A; U_{PN} en V).

Quelles sont sa f.é.m. E , sa résistance interne r , l'intensité de court-circuit? Tracer la caractéristique de cette pile.

7.3 La f.é.m. d'une pile est de 9 V, sa résistance interne de $2,4 \Omega$. Quelle est l'équation de sa caractéristique?

7.4 La tension mesurée aux bornes d'une pile lorsqu'elle ne débite pas est égale à 4,52 V; placée dans un circuit, elle débite un courant de 0,3 A, sa tension aux bornes étant égale à 4,04 V. Déterminer sa f.é.m. E , sa résistance r , l'intensité de court-circuit.

7.5 Des mesures d'intensité et de tension aux bornes d'une pile ont montré que sa caractéristique était rectiligne. On a, en particulier, les deux couples de valeurs suivantes :

(4,25 V; 200 mA) et (3,85 V; 600 mA).

1/ Tracer la caractéristique $U_{PN} = f(I)$.

2/ Déterminer sa f.é.m. E , sa résistance interne r et l'intensité théorique I_{CC} de court-circuit.

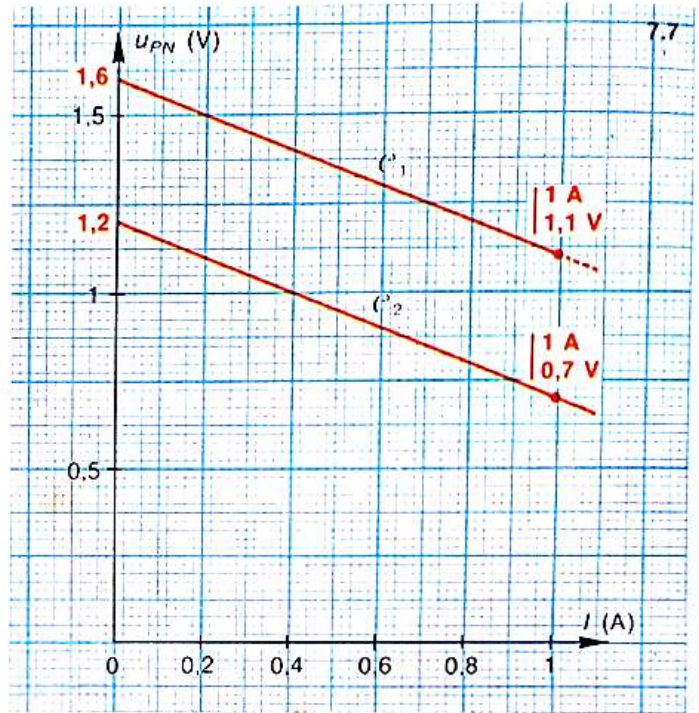
7.6 Une batterie d'accumulateurs a une f.é.m. de 12 V et une résistance interne de $0,02 \Omega$; sa caractéristique est rectiligne.

1/ Quelle est la chute de tension à ses bornes lorsqu'elle débite un courant de 0,5 A?

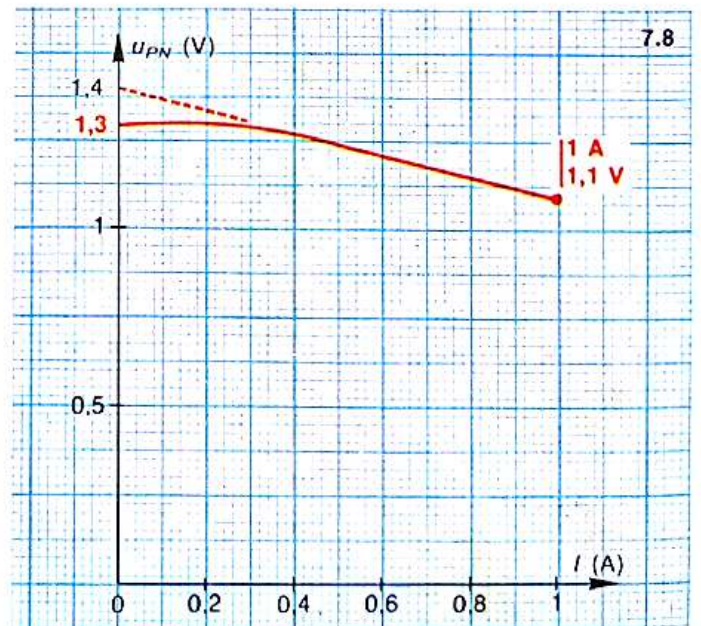
2/ Déterminer le courant de court-circuit théorique I_{CC} .

3/ Comparer ces résultats avec ceux d'une pile de 12 V et de résistance interne $4,5 \Omega$.

7.7 On a tracé la caractéristique d'une pile (R20) alcaline, la pile étant neuve (courbe 1), puis après un usage modéré (débit discontinu de 500 mA pendant 2 h) (courbe 2). Déterminer les équations de ces caractéristiques, la f.é.m. et la résistance interne de la pile neuve, puis de la pile un peu usagée. Comparer.



7.8 La figure ci-dessous représente la caractéristique d'une pile alcaline type Mallory (R20) un peu usagée.



1/ Quelle est la tension aux bornes de cette pile lorsqu'elle ne débite pas?

2/ Pour $0,3 \text{ A} < I < 1 \text{ A}$, on peut considérer que la pile est un générateur linéaire. Préciser l'équation de sa caractéristique, la f.é.m. et la résistance interne de la pile sur ce domaine.

Tracés de caractéristiques

7.9 On veut déterminer la caractéristique d'une pile Leclanché.

- 1/ Indiquer le schéma du montage à réaliser.
- 2/ On a relevé les couples de mesures suivants :

U_{PN} (V)	4,5	4,47	4,44	4,37	4,27	4,15	3,97
I (mA)	5	20	40	80	130	200	300

a/ Tracer la caractéristique intensité-tension :

$$I \mapsto U_{PN}(I).$$

b/ Donner l'équation de cette caractéristique. Déterminer la f.é.m. E et la résistance interne r de cette pile.

7.10 On veut tracer la caractéristique d'une batterie d'accumulateurs. L'expérience montre que l'on obtient des mesures reproductibles en opérant par valeurs décroissantes de l'intensité du courant débité. On obtient les résultats suivants :

U_{PN} (V)	6,20	6,22	6,24	6,26	6,29	6,30	6,32	6,36	6,40
I (A)	10	8	6	4	2	1,5	1	0,5	0

1/ Tracer la caractéristique :

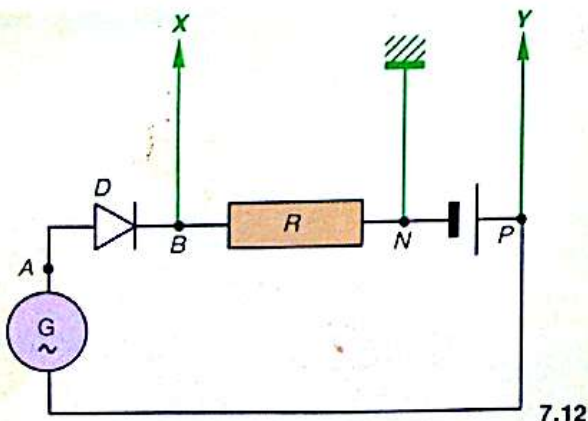
$$I \mapsto U_{PN}(I).$$

L'axe des tensions sera gradué de 6,0 V à 6,5 V, à l'échelle 2 cm \leftrightarrow 0,1 V; l'axe des intensités sera gradué de 0 à 10 A, à l'échelle 1 cm \leftrightarrow 1 A.

2/ La caractéristique peut être linéarisée sur un intervalle que l'on précisera. Établir l'équation de fonctionnement correspondante; déterminer la f.é.m. E et la résistance interne r qui correspondent à ce domaine d'utilisation.

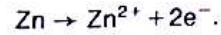
7.11 On considère la caractéristique d'une photopile (voir documents page 75). On peut y limiter deux domaines de linéarisation. Les préciser et donner les équations de fonctionnement, $u = f(I)$, pour chacun d'eux.

7.12 Pour visualiser la caractéristique d'une pile sur l'écran d'un oscillographe, on utilise le montage ci-dessous où G est un générateur de courant alternatif de tension maximale réglable, D une diode, composant qui ne laisse passer le courant que dans le sens A vers B .



- 1/ Quelle est la tension appliquée à l'entrée Y?
- 2/ Quelle est la tension appliquée à l'entrée X? Pourquoi dit-on qu'à cette tension correspond l'intensité du courant qui traverse la pile de N vers P ?
- 3/ Tracer l'allure de la caractéristique obtenue sur l'écran de l'oscillographe. Pourrait-on déterminer E et I_{CC} ?

7.13 Une pile Leclanché a une f.é.m. de 1,5 V. Le métal zinc qu'elle contient libère des électrons en se transformant en ions zinc selon l'équation :



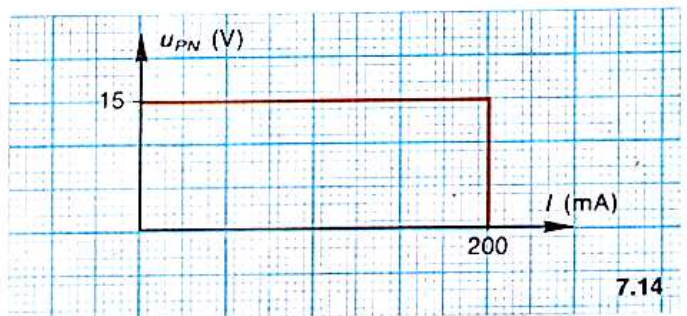
La masse de métal zinc ainsi transformable vaut initialement : 9,75 g. Calculer la durée de fonctionnement de cette pile si elle débite, en moyenne, un courant d'intensité 0,5 A.

Données : masse d'une mole ($6,02 \cdot 10^{23}$ atomes) de Zn: 65,4 g; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$.

7.14 Montrer tout d'abord que les équations :

$$U_{PN} = E - r \cdot I \quad \text{et} \quad I = I_{CC} - g \cdot U_{PN}$$

qui régissent le fonctionnement d'un générateur linéaire, sont équivalentes. La caractéristique d'une alimentation stabilisée étant représentée ci-dessous, déterminer, ensuite, les domaines d'utilisation tels que :



1/ L'alimentation se comporte comme un générateur idéal de tension, soit :

$$U_{PN} = E, \text{ quelle que soit } I;$$

qu'en est-il alors de la résistance interne du générateur?

2/ L'alimentation se comporte comme un générateur idéal de courant, soit :

$$I = I_{CC}, \text{ quelle que soit } U_{PN};$$

qu'en est-il alors de la conductance interne du générateur?

7.15 Une automobile est équipée d'une batterie de f.é.m. $E = 12$ V, de résistance interne négligeable ($r \approx 0$). Sa capacité, c'est-à-dire la quantité d'électricité totale qu'elle peut débiter, vaut 30 A.h.

1/ Pour faire démarrer le moteur, la batterie fournit un courant d'intensité moyenne 90 A durant 4 s. Calculer la quantité d'électricité débitée par la batterie au cours d'un démarrage. Si la batterie n'était pas rechargée, combien de démarrages pourrait-on effectuer? Quelle est la puissance électrique moyenne reçue par le démarreur?

2/ Le dispositif d'éclairage de la voiture consomme environ 120 W. Moteur arrêté, combien de temps la batterie peut-elle alimenter le dispositif d'éclairage?

3/ La résistance interne de la batterie vaut en fait $r = 0,01 \Omega$. En combien de temps la batterie se déchargerait-elle, en cas de court-circuit à ses bornes?

Lois d'associations

8.1 associations de conducteurs ohmiques

8.1.1 dipôles en série

Associons en série deux conducteurs ohmiques de résistance R_1 et R_2 (fig. 1).

Un même courant d'intensité I les traverse.

En appliquant la loi d'additivité des tensions puis la loi d'Ohm, la tension u aux bornes de l'ensemble s'écrit :

$$u = u_1 + u_2 = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I$$

soit
$$u = (R_1 + R_2) \cdot I = R \cdot I.$$

L'association se comporte comme un conducteur ohmique unique de résistance :

$$R = R_1 + R_2.$$

R est appelée résistance équivalente.

• Le dipôle équivalent à l'association en série de deux conducteurs ohmiques de résistances R_1 et R_2 est un conducteur ohmique de résistance :

$$R = R_1 + R_2.$$

Avec plusieurs conducteurs ohmiques en série de résistances R_1, R_2, \dots, R_n , on aurait :

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i.$$

8.1.2 dipôles en parallèle

Associons maintenant en parallèle (ou en dérivation) deux conducteurs ohmiques de résistances R_1 et R_2 (fig. 2).

Une même tension u est appliquée à leurs bornes.

La loi des nœuds donne :

$$I = I_1 + I_2.$$

La loi d'Ohm permet d'écrire, avec $G_1 = \frac{1}{R_1}$ et $G_2 = \frac{1}{R_2}$:

$$I = G_1 \cdot u + G_2 \cdot u = (G_1 + G_2) \cdot u = G \cdot u.$$

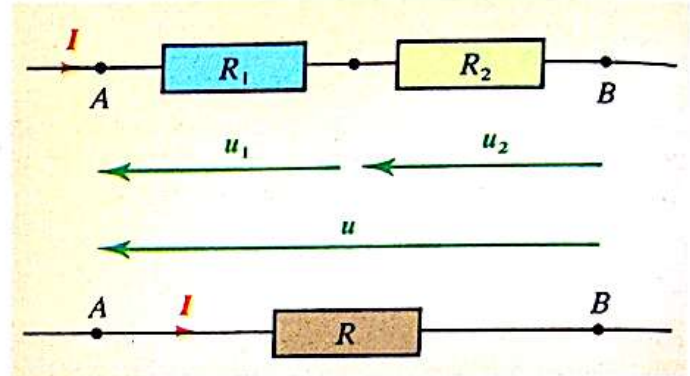
L'association se comporte comme un conducteur ohmique de conductance :

$$G = G_1 + G_2.$$

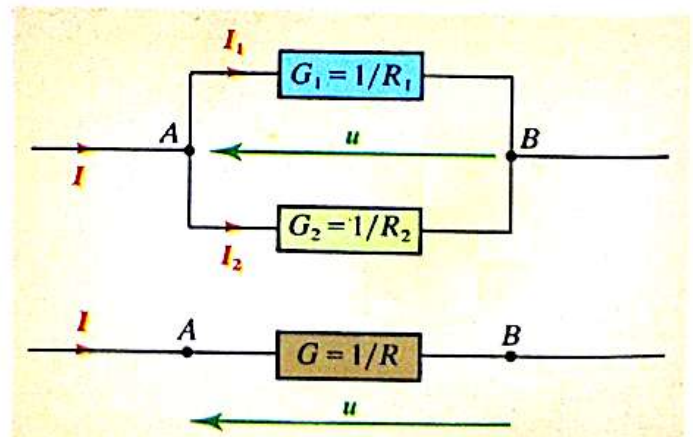
G est appelée conductance équivalente.

• Le dipôle équivalent à l'association en parallèle de deux conducteurs ohmiques de conductances respectives $G_1 (= 1/R_1)$ et $G_2 (= 1/R_2)$ est un conducteur ohmique de conductance :

$$G = G_1 + G_2 \iff R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$



1. Association en série de conducteurs ohmiques; résistance équivalente : $R = R_1 + R_2$.



2. Association en parallèle de conducteurs ohmiques; conductance équivalente : $G = G_1 + G_2$;

résistance équivalente : $R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$.

Avec plusieurs conducteurs ohmiques en parallèle de conductances G_1, G_2, \dots, G_n , on aurait :

$$G = G_1 + G_2 + \dots + G_n = \sum_{i=1}^n G_i$$

8.2 pile et conducteur ohmique en série

Associons en série (fig. 3) une pile de f.é.m. E et de résistance interne r avec un conducteur ohmique de résistance R . L'ensemble constitue un dipôle actif (P, N). Lorsque ce dipôle débite un courant I , nous avons :

$$U_{PN} = U_{PA} + U_{AN}$$

Or $U_{PA} = E - r \cdot I$ et $U_{AN} = -U_{NA} = -R \cdot I$.

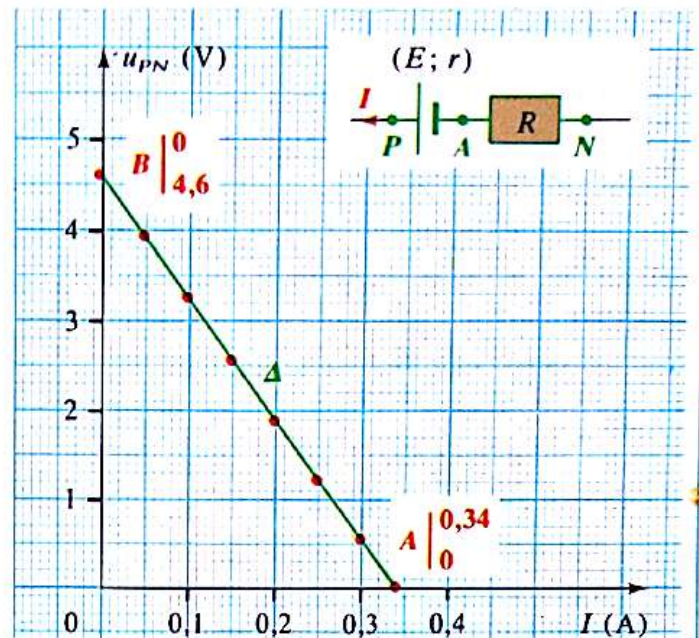
Finalement : $U_{PN} = E - (r + R) \cdot I$.

Cette dernière relation, où l'on a reconnu l'équation de la caractéristique d'un générateur linéaire, montre que :

- Le dipôle équivalent à l'association en série d'un conducteur ohmique de résistance R et d'une pile, de f.é.m. E et de résistance interne r , est un générateur linéaire de f.é.m. E et de résistance interne $(r + R)$.

La caractéristique de cette association peut être déterminée expérimentalement en procédant comme pour une simple pile (voir chapitre 7).

L'adjonction d'une résistance permet de minimiser le courant de court-circuit, et donc d'éviter la détérioration du générateur en cas d'incident. Mais la chute de tension $(r + R) \cdot I$ aux bornes du dipôle est plus importante pour un même courant débité.



3. Caractéristique d'un dipôle équivalent à l'association série pile-conducteur ohmique. Dans notre exemple :
 — pile ($E = 4,6 \text{ V}$; $r = 1,5 \Omega$), $R = 12 \Omega$;
 — coefficient directeur de la caractéristique : $-4,6/0,34 \approx -13,5$;
 — équation de la caractéristique : $u_{PN} = 4,6 - 13,5 \cdot I$.
 L'association est équivalente à un générateur linéaire de f.é.m. $4,6 \text{ V}$ et de résistance interne $13,5 \Omega$ (égale à $R + r$).

Application 1 :

Calculer la résistance équivalente du dipôle (A, B) avec $R_1 = 10 \Omega$, $R_2 = 20 \Omega$, $R_3 = 6 \Omega$, $R_4 = 9 \Omega$ (fig. 4 a).

L'association série (R_3, R_4) est équivalente à un conducteur ohmique de résistance

$$R' = R_3 + R_4 = 15 \Omega$$

L'association en parallèle (R', R_2) est équivalente à un conducteur ohmique de résistance R'' (fig. 4 b et 4 c) telle que :

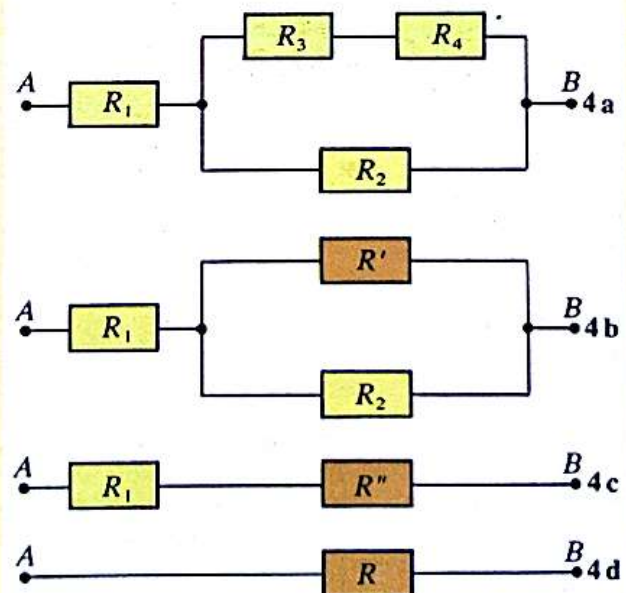
$$\frac{1}{R''} = \frac{1}{R'} + \frac{1}{R_2}$$

soit
$$R'' = \frac{R_2 \cdot R'}{R_2 + R'} = \frac{300}{35} = 8,6 \Omega$$

L'association en série (R'', R_1) est équivalente à un conducteur ohmique de résistance

$$R = R'' + R_1 = 18,6 \Omega$$

La résistance équivalente R de l'association (fig. 4 d) est $18,6 \Omega$.



8.3 associations de générateurs linéaires

Soient deux générateurs linéaires $(E_1; r_1)$ et $(E_2; r_2)$ associés en série comme l'indique la figure 5 : borne + de l'un relié à la borne - de l'autre. Une telle association est dite *en concordance* (si, au contraire, deux bornes de même nature étaient reliées entre elles, l'association serait dite *en opposition*).

Ces deux générateurs débitent un courant de même sens et de même intensité I . Aux bornes de l'association la tension est :

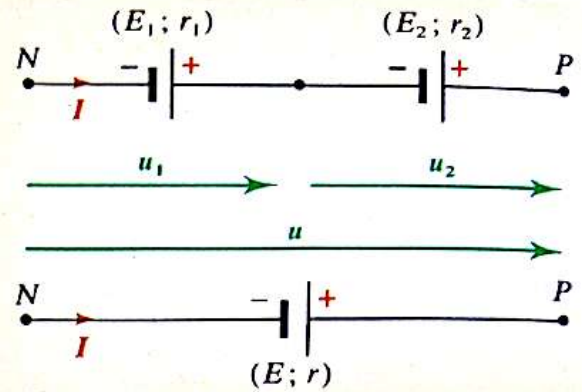
$$u = u_1 + u_2 = (E_1 - r_1 \cdot I) + (E_2 - r_2 \cdot I)$$

$$u = (E_1 + E_2) - (r_1 + r_2) \cdot I$$

Cette dernière relation montre que :

- Le dipôle équivalent à l'association de deux générateurs linéaires en série et en concordance est un autre générateur linéaire de f.é.m. $E_1 + E_2$ et de résistance interne $r_1 + r_2$.

Les f.é.m. s'ajoutent ainsi que les résistances internes. Ce résultat se généralise à l'association en série de n générateurs linéaires.



5. Association en série de deux générateurs linéaires; f.é.m. équivalente : $E = E_1 + E_2$; résistance interne : $r = r_1 + r_2$.

Le générateur linéaire équivalent est caractérisé par :

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_n = \sum_{i=1}^n E_i$$

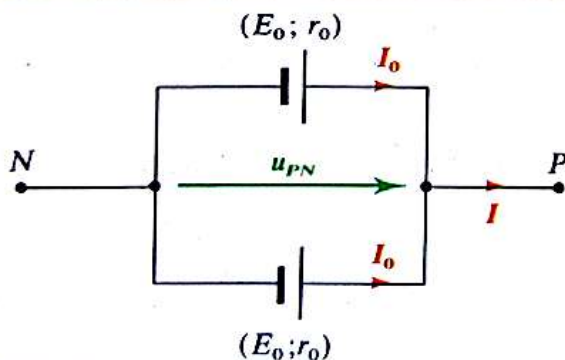
$$r = r_1 + r_2 + \dots + r_n = \sum_{i=1}^n r_i$$

On peut ainsi obtenir de grandes f.é.m.

Application 2 : Groupement parallèle de générateurs identiques

On associe comme l'indique la figure 6a, deux générateurs linéaires strictement identiques, de f.é.m. E_0 et de résistance interne r_0 .

Montrer que le dipôle équivalent à l'association est un générateur linéaire de f.é.m. E et de résistance interne r , que l'on calculera.



6a. Groupement en parallèle de deux générateurs identiques.

Lorsque l'intensité débitée par l'association est I , l'intensité du courant qui traverse chaque générateur est $I_0 = I/2$, puisque les deux générateurs sont identiques.

La tension aux bornes de chaque générateur est la même : c'est la tension u_{PN} qui existe entre les nœuds P et N .

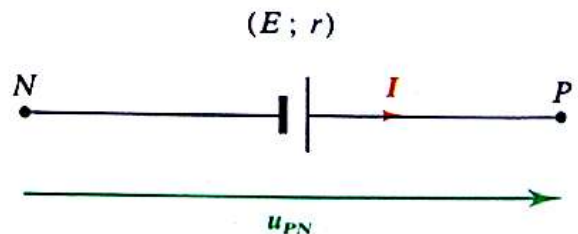
Aux bornes de chaque générateur, nous avons :

$$u_{PN} = E_0 - r_0 \cdot \frac{I}{2},$$

ce qui s'écrit encore :

$$u_{PN} = E_0 - \frac{r_0}{2} \cdot I.$$

Cette relation montre que le dipôle équivalent à l'association de deux générateurs linéaires identiques en parallèle est un générateur linéaire de f.é.m. $E = E_0$ et de résistance interne $r = r_0/2$ (fig. 6b).



6b. Générateur équivalent : $E = E_0$; $r = r_0/2$.

On peut généraliser ce résultat à un groupement en parallèle de n générateurs linéaires identiques $(E_0; r_0)$ et l'on obtient : $E = E_0$, $r = r_0/n$.

L'intérêt de telles associations réside dans la possibilité d'obtenir une intensité I importante, alors que chaque générateur ne débite qu'une intensité I/n .

Application 3 : Batterie de générateurs

On branche en parallèle m associations séries comportant chacune n générateurs identiques ($E ; r$).

Déterminer la f.é.m., la résistance interne et l'intensité du courant de court-circuit du dipôle actif ainsi constitué.

Chaque association série est équivalente à un dipôle actif de f.é.m. $E' = n \cdot E$, de résistance interne $r' = n \cdot r$ et d'intensité de court-circuit :

$$I_{CC} = \frac{E'}{r'} = \frac{n \cdot E}{n \cdot r} = \frac{E}{r} = I_{CC}$$

L'association en parallèle est équivalente à

l'association en parallèle de m dipôles actifs identiques ($E' ; r'$). Une telle batterie de générateurs identiques est donc équivalente (voir application 2) à un générateur de f.é.m. égale à :

$$E'' = E' = n \cdot E$$

et de résistance interne :

$$r'' = \frac{r'}{m} = \frac{n}{m} \cdot r$$

Enfin :
$$I''_{CC} = \frac{E''}{r''} = \frac{n \cdot E}{\frac{n}{m} \cdot r} = \frac{m \cdot E}{r} = m \cdot I_{CC}$$

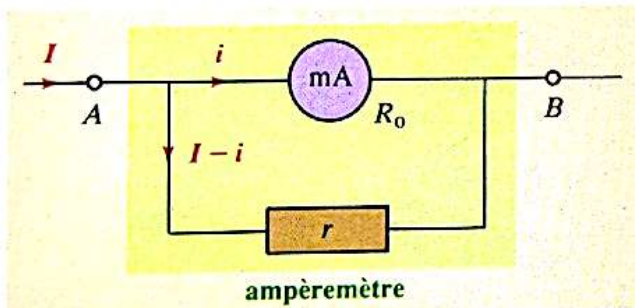
Fiche technique

transformations d'un milliampèremètre

Les ampèremètres et les voltmètres sont constitués d'un milliampèremètre très sensible auquel on associe des conducteurs ohmiques. Supposons que ce milliampèremètre (mA) ait une résistance R_0 de 2000Ω et qu'il dévie à son maximum avec un courant de $50 \mu A$ ($50 \cdot 10^{-6} A$).

• **Transformation en ampèremètre**

Si nous voulons mesurer une intensité beaucoup plus grande que $50 \mu A$, il faut *placer en dérivation*, aux bornes de l'appareil, un conducteur ohmique (appelé *shunt*), de faible résistance r , qui va dévier la plus grande partie du courant.



La loi d'Ohm aux bornes des deux dipôles donne :

$$u_{AB} = r \cdot (I - i) = R_0 \cdot i \implies \frac{I}{i} = \frac{r + R_0}{r} = 1 + \frac{R_0}{r}$$

Si nous voulons fabriquer une ampèremètre de calibre 1 A, il faut, lorsque $I = 1 A$, que l'aiguille dévie au maximum, c'est-à-dire que l'intensité i qui le traverse soit égale à $50 \mu A$. Pour cela :

$$\frac{I}{i} = \frac{1}{50 \cdot 10^{-6}} = 1 + \frac{2000}{r} \implies r = 0,1 \Omega$$

La résistance équivalente de l'association est

$$R = \frac{r \cdot R_0}{r + R_0} \approx 0,1 \Omega$$

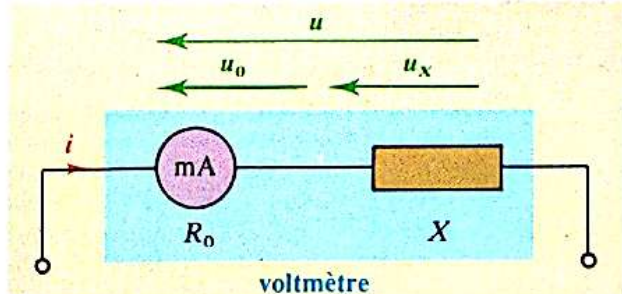
elle est faible car un ampèremètre, appareil placé en série, ne doit pas modifier sensiblement la valeur de l'intensité à mesurer.

• **Transformation en voltmètre**

La tension aux bornes du milliampèremètre traversé par un courant d'intensité i est : $u_0 = R_0 \cdot i$. Il est donc possible, puisque u_0 est proportionnelle à i , de mesurer une tension avec cet appareil. La tension maximale mesurable est obtenue pour $i = 50 \mu A$; u_0 vaut alors :

$$2000 \times 50 \cdot 10^{-6} = 0,1 V$$

Si nous voulons mesurer une tension plus grande, il faut *placer en série* avec le milliampèremètre, une grande résistance X qui va accaparer la plus grande partie de la tension.



La résistance de l'association est $R = X + R_0$ et l'on a :

$$u = u_0 + u_x = R_0 \cdot i + X \cdot i$$

$$u = (R_0 + X) \cdot i$$

Si nous voulons fabriquer un voltmètre de calibre 10 V, il faut prendre X tel que :

$$10 = (2000 + X) \times 50 \cdot 10^{-6}$$

soit :

$$X = 198000 \Omega$$

Notons que la résistance de l'association est $R_0 + X = 200000 \Omega$.

Cette résistance est très grande : un voltmètre, appareil placé en dérivation, ne doit en effet prélever qu'une très faible partie du courant pour ne pas perturber la mesure.

Faire le point

- Quelle est la résistance équivalente d'une association série de plusieurs conducteurs ohmiques?
- Démontrer le résultat précédent.
- Quelle est la résistance équivalente d'une association en parallèle de plusieurs conducteurs ohmiques?
- Démontrer le résultat précédent.
- Caractériser le générateur équivalent ($E; r$) à l'association en série d'une pile ($E_1; r_1$) et d'un conducteur ohmique (R).
- On associe en série deux générateurs ($E_1; r_1$) et ($E_2; r_2$); caractériser le dipôle équivalent.

Association de conducteurs ohmiques

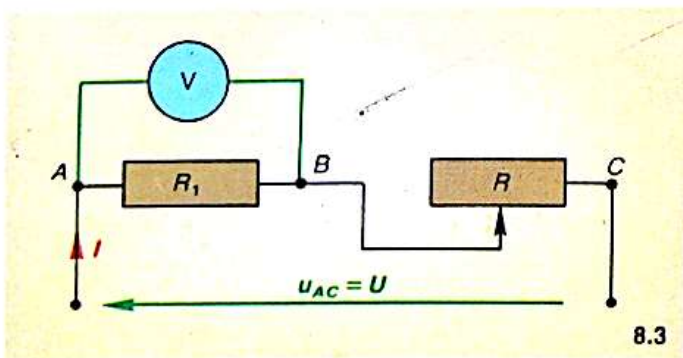
8.1 Deux conducteurs ohmiques, de résistances respectives 49Ω et 51Ω , sont associés en série.

- 1/ Quelle est la résistance du conducteur équivalent?
- 2/ Pour une tension de 10 V appliquée aux bornes de l'ensemble, quelle est l'intensité I du courant qui traverse chaque dipôle? quelles sont les tensions aux bornes de chaque dipôle?

8.2 Deux conducteurs ohmiques R_1 et R_2 sont associés en série; la tension aux bornes de l'ensemble est de 7 V ; la tension aux bornes de R_2 est de $2,3 \text{ V}$. Sachant que la résistance R_1 est égale à 470Ω , calculer :

- 1/ l'intensité I du courant qui traverse chaque dipôle;
- 2/ la résistance R_2 .

8.3 A un conducteur ohmique dont on veut déterminer la résistance R_1 , on associe en série un rhéostat étalonné dont la résistance R est connue par simple lecture. Aux bornes de l'ensemble, est appliquée une tension constante $u_{AC} = U$. Aux bornes de R_1 , le voltmètre mesure la tension u_{AB} . On règle la résistance R du rhéostat de telle façon que $u_{AB} = U/2$. Quelle relation simple existe-t-il, alors, entre R et R_1 ?



8.4 On veut déterminer la résistance R_x d'un conducteur ohmique. Pour cela, on le met en série avec un conducteur ohmique de résistance R connue avec une très grande précision. On applique aux bornes une tension U constante et on relève avec un bon voltmètre (de très grande résistance interne) les tensions u_x et u_R aux bornes de chaque dipôle.

- 1/ Faire un schéma du montage proposé.

2/ Calculer R_x en fonction de R , u_x et u_R .

3/ Application : $u_R = 5,0 \text{ V}$; $u_x = 4,7 \text{ V}$; $R = 50,05 \Omega$.

4/ Le voltmètre, de classe 2, est utilisé sur le calibre 5 V .

- a/ Quelle est l'incertitude sur chaque mesure u_x et u_R ?
- b/ En supposant que les seules incertitudes proviennent des mesures des tensions, donner l'incertitude pour la valeur de R_x obtenue. Conclure.

8.5 Deux conducteurs ohmiques de résistances respectives 9Ω et 13Ω sont associés en parallèle.

- 1/ Quelle est la résistance du conducteur équivalent?
- 2/ Quelles sont les intensités dans chaque dérivation pour une tension de 20 V appliquée aux bornes? Quelle est l'intensité dans la branche principale?

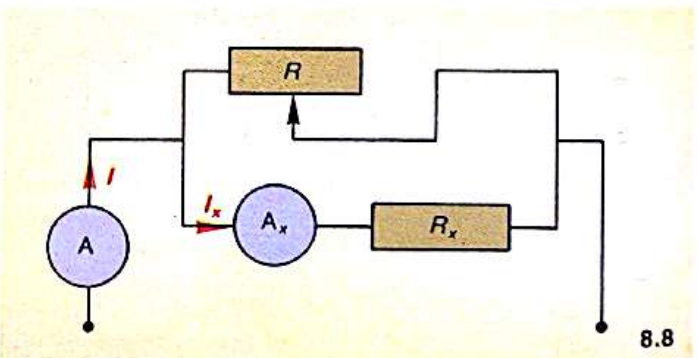
8.6 Deux conducteurs ohmiques de conductances respectives $0,021 \text{ S}$ et $0,019 \text{ S}$ sont associés en dérivation.

- 1/ Quelle est la conductance équivalente à l'association? Quelle est la résistance du conducteur équivalent?
- 2/ L'intensité totale qui traverse l'association est égale à 200 mA . Calculer la tension aux bornes de l'association et l'intensité du courant qui traverse chaque dipôle.

8.7 On associe en parallèle deux conducteurs ohmiques de résistances respectives R_1 et R_2 . L'intensité du courant qui traverse l'association vaut $I = 150 \text{ mA}$, celle du courant qui traverse R_2 vaut $I_2 = 50 \text{ mA}$. Sachant que la résistance R_1 est égale à 330Ω , calculer :

- 1/ la tension aux bornes de l'association;
- 2/ la résistance R_2 .

8.8 Pour déterminer la résistance R_x d'un conducteur ohmique inconnu, on réalise le montage de la figure ci-après. On lui associe, en parallèle, un rhéostat étalonné (lecture directe de R). A l'aide d'un générateur, on fait circuler un courant constant I dans l'association. Le rhéostat est réglé de telle façon que $I_x = I/2$. Quelle relation simple existe-t-il alors entre R et R_x ?

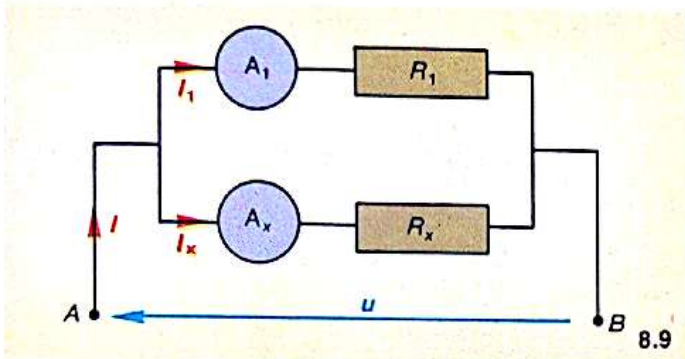


8.9 On veut déterminer la résistance R_x d'un conducteur ohmique. Pour cela on le branche en parallèle avec un autre conducteur de résistance R_1 connue avec une grande précision. On applique une tension U aux bornes de l'ensemble et on relève avec deux bons ampèremètres (la chute de tension aux bornes de ces appareils est négligeable) les intensités des courants I_1 et I_x qui les traversent.

- 1/ Calculer R_x en fonction de I_1 , I_x et R_1 .
- 2/ Application numérique : $R_1 = 500,1 \Omega$; $I_1 = 58 \text{ mA}$; $I_x = 42 \text{ mA}$. Calculer R_x .

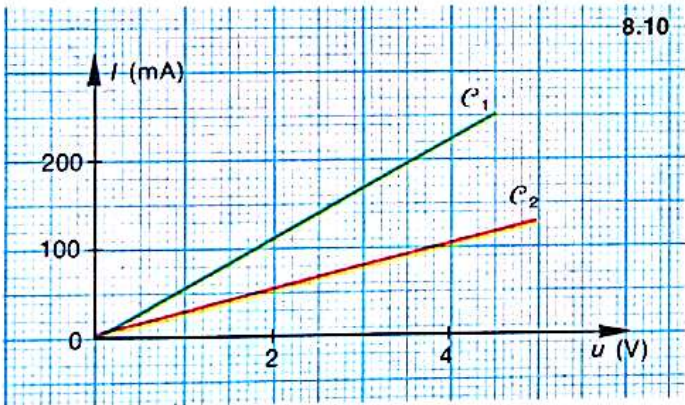
3/ Les deux appareils sont de classe 1,5 et sont utilisés sur le calibre 100 mA.

- a/ Quelle est l'incertitude sur les mesures de I_1 et I_x ?
- b/ En supposant que les seules incertitudes sur la mesure proviennent de celles dues aux mesures des intensités, donner l'incertitude pour la valeur de R_x obtenue. Conclure.



8.10 On a tracé les caractéristiques C_1 et C_2 de deux dipôles symétriques. On a obtenu deux segments de droite passant par l'origine.

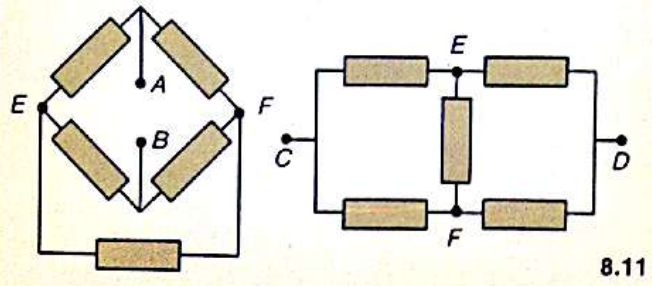
- 1/ Peut-on dire que ces dipôles se comportent comme des conducteurs ohmiques?
- 2/ Quel est celui qui a la plus forte résistance? la plus forte conductance?
- 3/ Reproduire ce graphique et construire rapidement la caractéristique du dipôle équivalent à l'association série et celle équivalent à l'association parallèle.



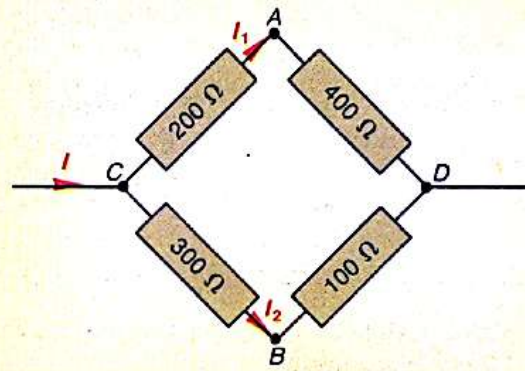
Résistance équivalente

8.11 Les deux dipôles ci-après (A, B) et (C, D) sont constitués de conducteurs ohmiques tous identiques, de résistance R.

- 1/ Peut-on considérer que ces deux dipôles sont identiques?
- 2/ Lorsqu'on applique une tension u_{AB} ou u_{CD} aux bornes de ces deux dipôles, l'intensité du courant qui circule dans l'un des conducteurs ohmiques est nulle. Lequel et pourquoi?
- 3/ En déduire la résistance du conducteur ohmique équivalent aux deux dipôles.



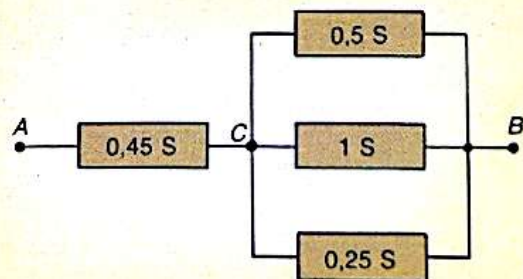
8.12 On considère le réseau ci-dessous. Tous les dipôles sont des conducteurs ohmiques.



- 1/ Calculer la résistance du dipôle équivalent (C, D).
- 3/ Si $I = 0,2$ A, quelle est la tension u_{CD} ?
- 3/ Calculer I_1 et I_2 ; calculer la tension u_{AB} .
- 4/ Reprendre les mêmes questions dans le cas où on relie A et B par un fil de résistance négligeable.

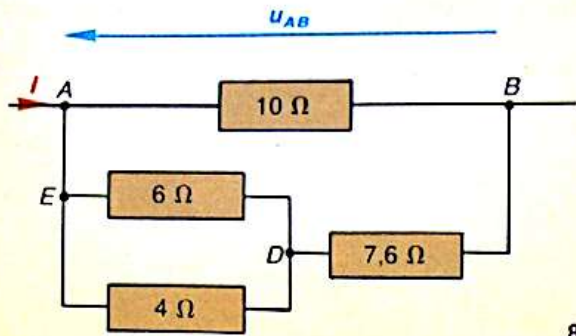
8.13 Soit le réseau schématisé ci-dessous.

- 1/ Calculer la résistance équivalente aux trois conducteurs ohmiques placés en parallèle. Quelle est la résistance du réseau entre les points A et B?
- 2/ On applique une tension $u_{AB} = 6$ V. Calculer l'intensité du courant qui circule entre A et C. En déduire la tension entre C et B. Calculer alors l'intensité du courant dans chaque dipôle.



8.14 Le réseau figuré ci-après comporte des conducteurs ohmiques. La tension u_{AB} vaut 10 V.

- 1/ Déterminer la résistance du conducteur équivalent vue des points A et B.
- 2/ Calculer les intensités dans chaque branche et l'intensité du courant principal I.



8.14

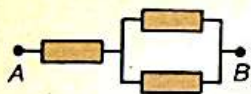
8.15 Tous les circuits ci-dessous sont constitués de conducteurs ohmiques identiques de résistance $R = 1 \Omega$.

1/ Montrer que les résistances équivalentes vues des points A et B sont respectivement pour les circuits a, b

et c : $\frac{3}{2}$, $\frac{8}{3}$ et $\frac{7}{8}$ d'ohm.

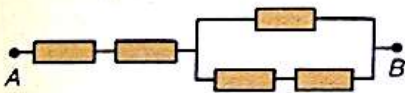
2/ Pour faire ce calcul, on s'est servi de fractions; par exemple : $\frac{8}{3} = 2 + \frac{1}{1 + \frac{1}{2}}$. Quelle est la décomposition de $\frac{7}{8}$?

3/ Montrer que la résistance vue des points A et B du circuit d peut s'écrire $R_{AB} = \frac{p}{q}$ avec p et $q \in \mathbb{N}$. En déduire alors la décomposition de cette fraction en sommes et quotients de fractions simples.

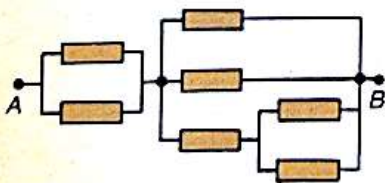


8.15

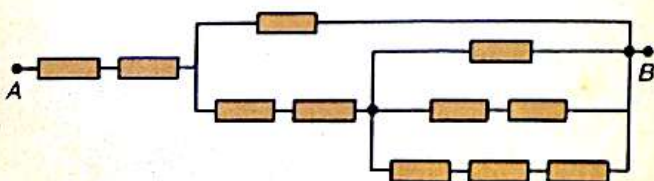
(a)



(b)



(c)

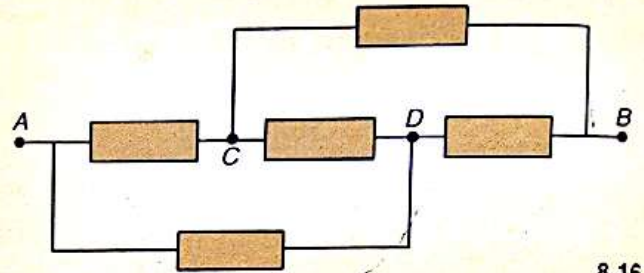


(d)

8.16 Le schéma ci-dessous représente un réseau constitué de conducteurs ohmiques tous identiques, de résistance R .

1/ Lorsqu'on applique une tension entre les bornes A et B de ce réseau, on constate qu'il circule un courant de même intensité dans chaque conducteur, sauf dans l'un où l'intensité est nulle. Lequel? Justifier votre réponse.

2/ En déduire la résistance équivalente entre les bornes A et B. Comparer le résultat avec l'exercice précédent. Conclure.



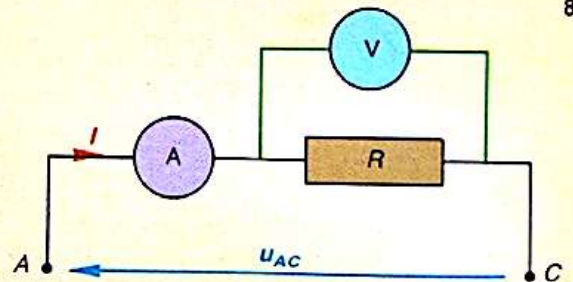
8.16

Influence des appareils sur une mesure

8.17 Aux bornes du circuit ci-dessous, on applique une tension u_{AC} qui peut être variable. On réalise les expériences suivantes :

1/ On mesure la tension u_1 aux bornes du conducteur ohmique avec un voltmètre électronique; l'intensité dans le voltmètre est quasi nulle. Le voltmètre indique $u_1 = 45 \text{ V}$ et l'ampèremètre $I = 15 \text{ mA}$. Calculer la résistance R .

2/ On remplace le voltmètre par un voltmètre de mauvaise qualité qui détourne une partie du courant; on règle la tension u_{AC} pour que l'ampèremètre indique toujours $I = 15 \text{ mA}$. En considérant le voltmètre équivalent à un conducteur ohmique de résistance $R_V = 6000 \Omega$, calculer la tension u_2 qu'il indiquera. Quelle est la fraction du courant d'intensité I détournée par le voltmètre de mauvaise qualité?



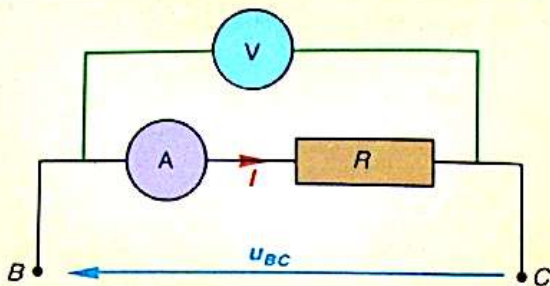
8.17

8.18 Aux bornes B et C du montage schématisé ci-après, on applique une tension $u_{BC} = U$ constante. On réalise les deux expériences suivantes :

1/ On emploie un ampèremètre électronique dont la chute de tension aux bornes est quasi nulle. On trouve $I_1 = 12 \text{ mA}$; $u_{BC} = 5,6 \text{ V}$. Calculer R .

2/ On emploie maintenant un ampèremètre de qualité moyenne. On peut admettre qu'il est équivalent à un conducteur ohmique de résistance $r = 124 \Omega$. La tension u_{BC} étant toujours constante et égale à $5,6 \text{ V}$, quelle est l'intensité indiquée par l'ampèremètre? Quelle est la chute de tension à ses bornes?

8.18



Association pile-conducteur ohmique

8.19 On associe en série une pile (4,5 V, 1,5 Ω) et un conducteur ohmique de résistance 47 Ω.

- 1/ Déterminer la f.é.m. et la résistance du dipôle actif ainsi constitué.
- 2/ Tracer sa caractéristique $u = f(I)$.
- 3/ Déterminer l'intensité de court-circuit théorique.

8.20 Une pile de force électromotrice 9 V a une résistance interne de 2,1 Ω. Quelle doit être la valeur de la résistance du conducteur ohmique à placer en série avec la pile pour que l'intensité de court-circuit du dipôle ainsi constitué soit 0,5 A?

8.21 La caractéristique d'un accumulateur est rectiligne. Son équation est :

$$u_{PN} = 6 - 0,01 \cdot I \quad (u_{PN} \text{ en V, } I \text{ en A}).$$

On place en série avec cet accumulateur un conducteur ohmique de résistance 120 Ω.

- 1/ Tracer la caractéristique du dipôle linéaire ainsi constitué.
- 2/ Quelles sont sa f.é.m. E , sa résistance interne r et le courant de court-circuit I_{CC} théorique? Comparer ce courant à celui de l'accumulateur seul.
- 3/ Comparer les chutes de tension aux bornes de l'accumulateur seul et aux bornes de l'association lorsque ces dipôles débitent un courant de 40 mA.

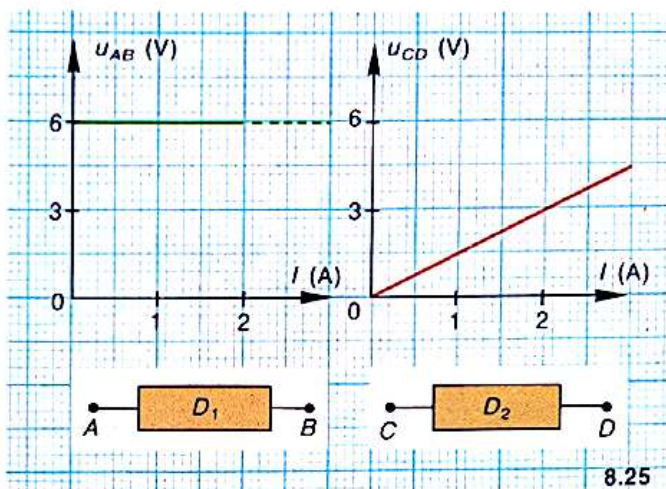
8.22 Représenter la caractéristique d'une pile de f.é.m. $E = 4,5 \text{ V}$ et de résistance interne $r = 1,5 \Omega$. En déduire la caractéristique de l'association série de deux piles identiques à la précédente.

8.23 Représenter la caractéristique d'une pile de f.é.m. $E = 1,5 \text{ V}$ et de résistance interne $r = 0,6 \Omega$. En déduire la caractéristique de l'association en parallèle de deux piles identiques à la précédente.

8.24 On associe convenablement en série deux piles (4,5 V; 1,4 Ω) et (1,5 V; 0,6 Ω).

- 1/ Quelles sont la f.é.m. E et la résistance interne r de l'association?
- 2/ Lorsque cette association débite un courant de 0,2 A, quelles sont les tensions aux bornes de chaque pile?

8.25 On a tracé la caractéristique de deux dipôles : D_1 un dipôle actif (A, B) et D_2 (C, D). On relie B à C. Déterminer la caractéristique du dipôle actif (A, D) ainsi constitué, sa f.é.m. équivalente et sa résistance interne r .



8.25

8.26 On dispose de piles identiques (1,52 V; 1,2 Ω) et on veut réaliser un générateur de f.é.m. de l'ordre de 6 V en les associant en série.

- 1/ Donner un schéma du montage réalisé.
- 2/ Quelle est la résistance interne et la f.é.m. du générateur équivalent?
- 3/ Lorsque l'association débite un courant de 0,12 A, quelle est la tension aux bornes de l'association?

8.27 On associe en série quatre accumulateurs cadmium-nickel identiques pour former un générateur de f.é.m. de l'ordre de 6 V. Avec un voltmètre électronique, on mesure directement la f.é.m. de l'association en prenant la tension aux bornes de l'ensemble. L'un des accumulateurs étant mal disposé, on trouve une tension de 3,24 V seulement. A l'aide d'un schéma clair, donner une explication à ce phénomène. Quelle est la f.é.m. de chaque accumulateur?

8.28 Exercice sur le document.

1/ Transformation d'un milliampèremètre en ampèremètre.

Un milliampèremètre de résistance interne 300 Ω comporte un cadran de 100 divisions. La déviation de l'aiguille est maximale lorsque l'appareil est traversé par un courant d'intensité 10 mA.

a/ Donner les valeurs des shunts correspondant aux calibres 30 mA, 100 mA, 0,3 A et 1 A.

b/ Quelle est dans chaque cas la conductance de l'appareil? Conclure.

2/ Transformation d'un milliampèremètre en voltmètre. Le milliampèremètre de la question précédente est utilisé en voltmètre. Déterminer les valeurs des résistances à ajouter en série pour avoir les calibres 3 V et 10 V. Quelle est dans chaque cas la résistance équivalente?

9.

Point de fonctionnement d'un circuit Loi de Pouillet

9.1 point de fonctionnement d'un circuit

Considérons le plus simple des circuits, constitué d'un dipôle actif (pile de f.é.m. E et de résistance interne r) et d'un conducteur ohmique de résistance R (fig. 1). Lorsque l'interrupteur est fermé, les deux dipôles sont parcourus par un courant de même intensité I . De plus, si on admet que les fils de jonction et l'ampèremètre n'accaparent aucune tension, les deux dipôles ont également à leurs bornes la même tension :

$$U = U_{PN} = U_{AB}.$$

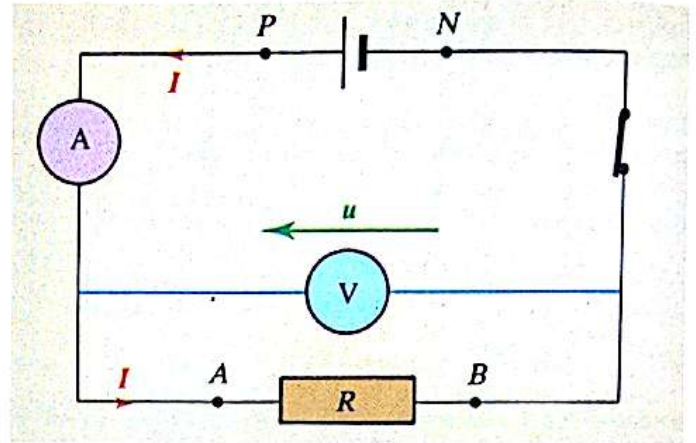
Le problème que nous nous posons est de déterminer le couple (I, u) , appelé *point de fonctionnement* des deux dipôles.

9.1.1 méthode graphique

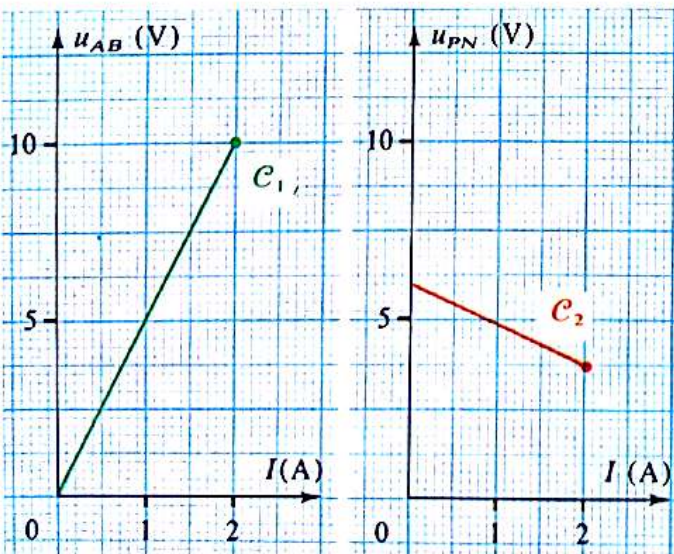
Nous connaissons les caractéristiques C_1 et C_2 des deux dipôles (fig. 2a). Reportons les dans le même repère cartésien (fig. 2b).

- Le point de fonctionnement $F(I, u)$ doit appartenir à la fois aux deux caractéristiques; il se trouve donc à leur intersection.

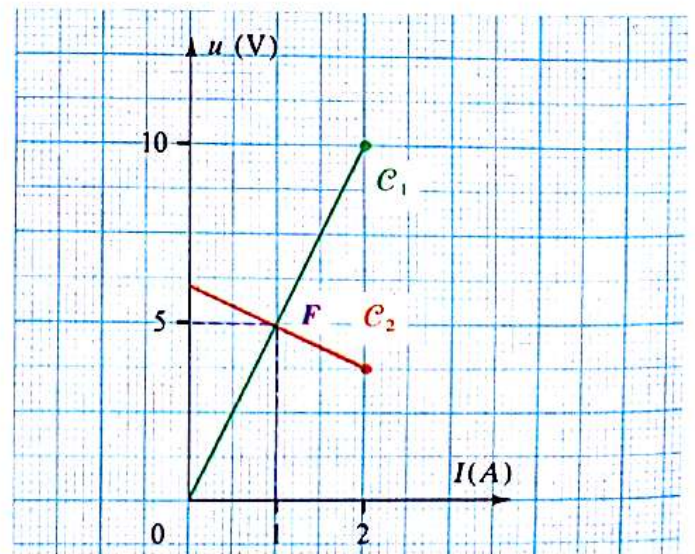
La fiche expérimentale ci-après traite d'un tel problème et généralise la méthode, avec un dipôle (A, B) non linéaire constitué par une lampe à incandescence.



1. La tension est pratiquement identique aux bornes du générateur et du conducteur ohmique : $u = u_{PN} = u_{AB}$.



2a. Caractéristiques du conducteur ohmique (à gauche) et du générateur (à droite), tracées avec la même échelle.



2b. Le point de fonctionnement F se situe à l'intersection des deux caractéristiques.

9.1.2 détermination par le calcul

Nous connaissons l'équation de la caractéristique d'une pile ($E; r$):

$$u_{PN} = E - r \cdot I.$$

Celle d'un conducteur ohmique de résistance R est donnée par la loi d'Ohm :

$$u_{AB} = R \cdot I.$$

Associés comme l'indique la figure 1 :

$$u_{PN} = u_{AB} = u, \text{ d'où } E - r \cdot I = RI,$$

soit :

$$I = \frac{E}{R+r} \text{ et } u = \frac{R}{R+r} \cdot E.$$

Application 1 : Adaptation de deux dipôles

Un générateur, de f. é. m. $E = 12 \text{ V}$ et de résistance interne $r = 50 \Omega$, dans les conditions de fonctionnement, est associé en série avec un conducteur ohmique de résistance $R = 470 \Omega$ pour former un circuit. La puissance maximale pouvant être dissipée dans le conducteur est $0,5 \text{ W}$.

1/ Calculer le point de fonctionnement du circuit.

2/ Vérifier que la puissance consommée dans le conducteur ohmique est inférieure à la puissance tolérée. On dit alors que les deux dipôles associés sont « adaptés ».

1/ Appliquons directement les résultats du paragraphe 9.1.2 :

$$I = \frac{E}{R+r} = \frac{12}{520} \approx 0,023 \text{ A};$$

$$u = \frac{R}{R+r} \cdot E = 10,85 \text{ V}.$$

2/ La puissance consommée dans le conducteur ohmique vaut :

$$\mathcal{P} = u \cdot I$$

$$\mathcal{P} = 10,85 \times 0,023 \approx 0,25 \text{ W} < 0,5 \text{ W};$$

le conducteur ohmique est bien adapté au générateur.

Fiche expérimentale

détermination graphique d'un point de fonctionnement

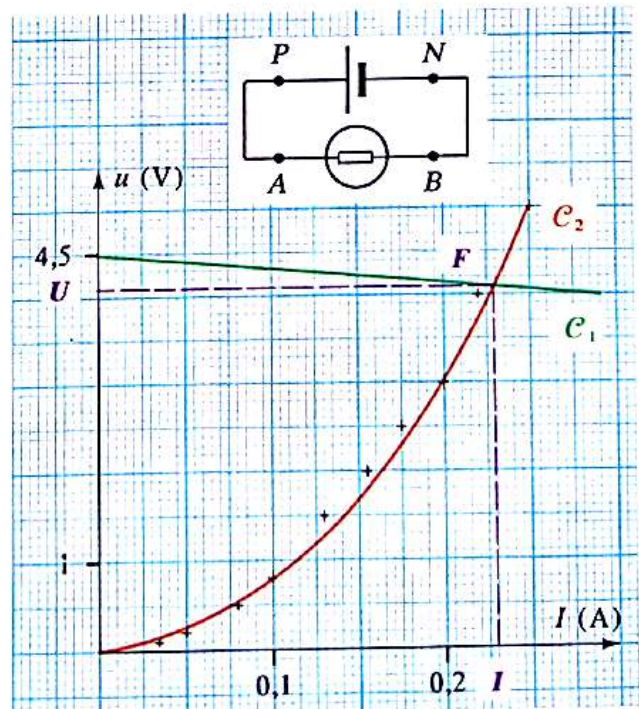
Associons la pile ($E = 4,5 \text{ V}$; $r = 1,5 \Omega$) étudiée au chapitre 7 (page 71) et la lampe étudiée au chapitre 6 (page 61). Nous nous proposons de déterminer graphiquement le point de fonctionnement $F(I, u)$ de cette association.

Le point F est à l'intersection des deux caractéristiques C_1 et C_2 de la pile et de la lampe. Sa détermination précise est difficile à réaliser; elle dépend beaucoup du soin apporté aux tracés des caractéristiques.

On lit : $u \approx 4,1 \text{ V}$ et $I \approx 0,23 \text{ A}$.

Ces valeurs peuvent être légèrement différentes de celles mesurées directement avec un ampèremètre et un voltmètre; en effet ces appareils perturbent sensiblement le circuit s'ils ne sont pas d'excellentes qualités.

On ne peut, ici, déterminer par le calcul le point de fonctionnement, car on ne connaît pas, pour la lampe, de relation simple entre u et I .

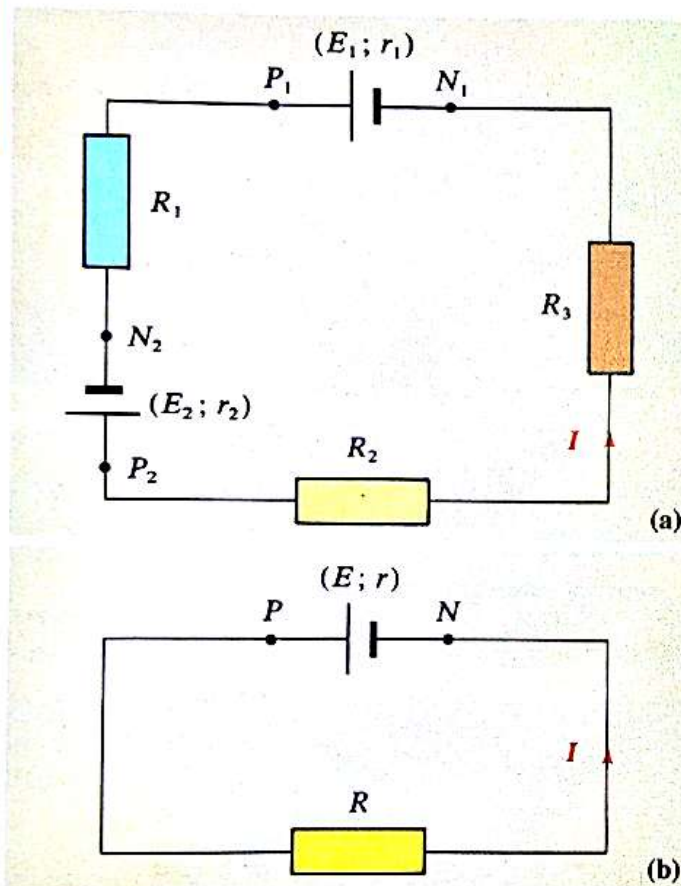


9.2 loi de Pouillet

Considérons un circuit série comportant 2 piles en concordance et 3 conducteurs ohmiques (fig. 3a).

- Les 2 piles sont équivalentes à une pile :
 - de f.é.m. $E = E_1 + E_2$;
 - de résistance interne $r = r_1 + r_2$.
- Les 3 conducteurs ohmiques sont équivalents à un seul conducteur ohmique de résistance $R = R_1 + R_2 + R_3$.
- L'intensité du courant du circuit, équivalent à une pile associée à un conducteur ohmique (fig. 3b), est donc :

$$I = \frac{E}{R+r} = \frac{E_1 + E_2}{(R_1 + R_2 + R_3) + (r_1 + r_2)}$$



3. Les circuits (a) et (b) sont équivalents, avec :
 $E = E_1 + E_2$, $r = r_1 + r_2$, $R = R_1 + R_2 + R_3$.
 Ils sont parcourus par un même courant I .

Généralisons; on obtient la loi de Pouillet :

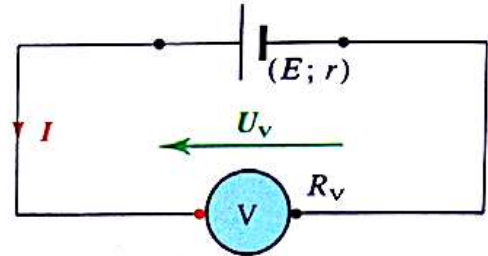
- Dans un circuit série comportant plusieurs piles en concordance et des conducteurs ohmiques, l'intensité du courant est égale au quotient de la somme des f.é.m. des diverses piles par la somme des résistances des conducteurs ohmiques et des résistances internes des piles :

$$I = \frac{\sum E}{\sum R_i + \sum r_i}$$

Notons que le résultat obtenu au paragraphe 9.1.2 est un cas particulier de cette relation pour un circuit ne comportant qu'un générateur et un conducteur ohmique.

Application 2 :

Un générateur de f.é.m. $E = 1 \text{ V}$ a une très grosse résistance interne r estimée à 5000Ω . On dispose d'un voltmètre de résistance $R_V = 2000 \Omega$. Qu'indique cet appareil quand on le branche aux bornes de la pile? Plus généralement, calculer la tension indiquée par un voltmètre branché aux bornes d'une pile.



Soit U_V la tension maintenue aux bornes du voltmètre. Considérons que ce dernier se comporte comme un conducteur ohmique; il vient :

$$I = \frac{E}{r + R_V} \quad \text{et} \quad U_V = R_V \cdot \frac{E}{r + R_V}$$

soit :

$$U_V = 2000 \times \frac{1}{5000 + 2000} \approx 0,29 \text{ V.}$$

L'appareil indique moins du tiers de la f.é.m. E que l'on espérait mesurer.

Plus généralement, considérons la relation :

$$U_V = R_V \cdot \frac{E}{r + R_V} = \frac{E}{1 + r/R_V}$$

Si $R_V \gg r$, alors $r/R_V \ll 1$ et $U_V \approx E$.

Le voltmètre mesure alors pratiquement la f.é.m. de la pile. Par exemple, avec une pile (4,5 V; 2 Ω), toujours avec $R_V = 2000 \Omega$:

$$U_V = \frac{E}{1,001} \approx 4,5 \text{ V.}$$

Retenons que pour mesurer directement la f.é.m. d'un générateur avec un voltmètre branché à ses bornes, ce dernier doit posséder une résistance très grande devant celle du générateur.

Application 3 :

Dans le circuit de la figure 3a, calculer l'intensité du courant et la tension aux bornes de la pile (E_1 ; r_1). On donne :

$$E_1 = 6 \text{ V}; \quad r_1 = 1 \Omega; \quad E_2 = 4 \text{ V}; \quad r_2 = 4 \Omega;$$

$$R_1 = R_2 = 10 \Omega; \quad R_3 = 15 \Omega.$$

C'est une application directe de la loi de Pouillet :

$$I = \frac{\sum E}{\sum r + \sum R} = \frac{10}{40} = 0,25 \text{ A.}$$

La tension aux bornes de la pile est :

$$U = E_1 - r_1 \cdot I = 6 - 1 \times 0,25 = 5,75 \text{ V.}$$

On vérifiera que la tension aux bornes de la seconde pile est égale à 3 V.

Faire le point

- Qu'appelle-t-on point de fonctionnement d'un circuit?
- Énoncer la loi de Pouillet.
- Démontrer la loi de Pouillet pour un circuit simple.

9.1 Un circuit comprend en série un générateur de f.é.m. $E = 2 \text{ V}$, de résistance interne $0,1 \Omega$, et un conducteur ohmique de résistance $3,9 \Omega$. Déterminer graphiquement, puis par le calcul, l'intensité du courant ainsi que la tension aux bornes du générateur.

9.2 Un conducteur ohmique de résistance $R = 8 \Omega$ est branché successivement aux bornes d'une pile ($E_1 = 4,5 \text{ V}$; $r_1 = 2 \Omega$) et d'un accumulateur ($E_2 = 6 \text{ V}$; $r_2 = 0,03 \Omega$).

1/ Quelle est, dans chaque cas, l'intensité du courant dans le circuit?

2/ Si, dans les circuits réalisés, on court-circuite le conducteur ohmique, que devient l'intensité du courant? Conclure.

9.3 Un générateur dont la f.é.m. est 5 V débite un courant de 1 A dans un conducteur ohmique de résistance R , et un courant de $0,505 \text{ A}$ dans un conducteur ohmique de résistance $2R$. Calculer la résistance interne de ce générateur et la résistance R .

9.4 On branche aux bornes d'une pile, de f.é.m. E égale à $4,5 \text{ V}$ et de résistance interne r , une ampoule qui porte les indications ($3,5 \text{ V}$; $0,2 \text{ A}$). Quelle doit être la valeur de r pour que l'ampoule soit bien adaptée à la pile?

9.5 On considère l'association série d'une pile (A, B) de borne positive A ($E = 4,5 \text{ V}$; $r = 2 \Omega$) et d'un conducteur ohmique (B, C) de résistance 9Ω .

1/ Quelle est l'équation de la caractéristique du dipôle (A, C)?

2/ On constitue un circuit en branchant ce dipôle aux bornes d'un conducteur ohmique de résistance 8Ω . Quelle est l'intensité dans ce circuit? Quelle est la tension aux bornes de chaque dipôle? (Étude graphique et calculs.)

9.6 Un thermocouple sert à mesurer une différence de température entre deux points. Il est constitué d'un générateur de résistance interne r et dont la f.é.m. E est fonction linéaire de la différence de température θ : $E = E(\theta) = 5,5 \cdot 10^{-5} \cdot \theta$, avec E en V et θ en $^{\circ}\text{C}$. La résistance interne est supposée indépendante de la température: $r = 10 \Omega$.

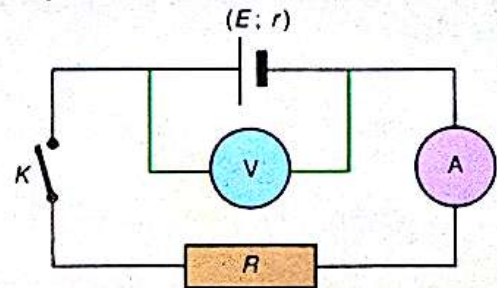
1/ Déterminer l'intensité de court-circuit $I_{cc}(\theta)$.

2/ Le thermocouple est directement branché aux bornes d'un microampèremètre, de calibre $300 \mu\text{A}$, assimilable à un conducteur ohmique de résistance $R = 100 \Omega$. Exprimer θ en fonction de l'intensité mesurée par le microampèremètre. Quelle est la valeur de θ lorsque l'intensité mesurée vaut $135 \mu\text{A}$?

3/ Peut-on habituellement brancher un ampèremètre directement aux bornes d'un générateur? Quelles seraient l'intensité du courant et les conséquences prévisibles si le microampèremètre précédent était branché directement aux bornes d'une pile ($E = 1,5 \text{ V}$; $r = 0,5 \Omega$)?

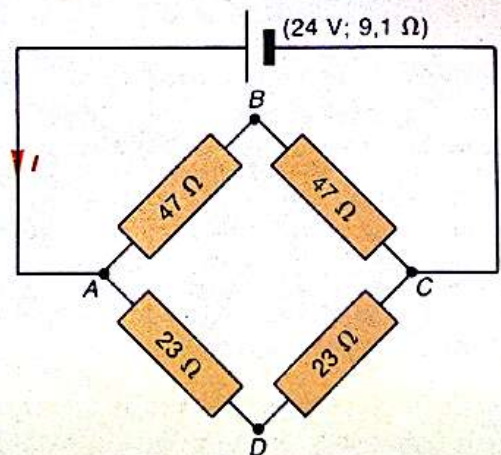
9.7 Aux bornes d'une pile, on branche un voltmètre de résistance interne 75000Ω . La tension mesurée est $4,5 \text{ V}$. Lorsque la pile débite dans un conducteur ohmique de résistance R , la tension aux bornes de la pile, mesurée avec le même voltmètre, est de $4,2 \text{ V}$ alors que l'intensité qui la traverse est de 200 mA . Calculer la f.é.m. et la résistance interne de la pile. Faire un schéma du montage et préciser les hypothèses simplificatrices.

9.8 Considérons le montage ci-dessous; le générateur est une pile de résistance r et de f.é.m. E . Le voltmètre et l'ampèremètre ne perturbent pas la mesure. K ouvert, on lit $U = 4,6 \text{ V}$. K fermé, on lit $U = 4,1 \text{ V}$ et $I = 0,3 \text{ A}$. Déterminer la résistance interne de la pile, la résistance R du conducteur ohmique et la f.é.m. de la pile.



9.8

9.9 Le circuit ci-dessous comprend un générateur linéaire et des conducteurs ohmiques.



9.9

1/ Calculer la résistance R équivalente aux conducteurs ohmiques situés entre A et C.

2/ Calculer l'intensité I du courant principal.

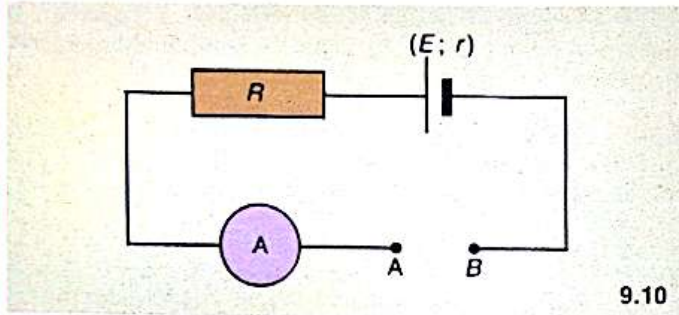
3/ Déterminer la tension u_{AC} . En déduire l'intensité dans chaque branche de la dérivation.

4/ Calculer u_{BD} .

Construction d'un ohmmètre

9.10 On associe en série, entre deux bornes A et B, une pile (E; r), un conducteur ohmique de résistance R et un milliampèremètre de résistance R_A. Le milliampèremètre comporte 100 graduations; il est utilisé sur le calibre I_M = 1 mA.

1/ On court-circuite les bornes A et B par un fil de jonction. Déterminer R pour que l'ampèremètre dévie au maximum.



9.10

2/ On place, entre A et B, un conducteur ohmique de résistance X. Soit I l'intensité du courant qui circule dans le circuit. En posant R₀ = r + R + R_A, déterminer le rapport I/I_M en fonction de R₀ et X.

3/ Soit n la division correspondante à l'intensité I. Déterminer X en fonction de n et R₀.

4/ Application numérique. Déterminer R et X pour : E = 1,5 V; r = 1,2 Ω; R_A = 250 Ω; n = 75.

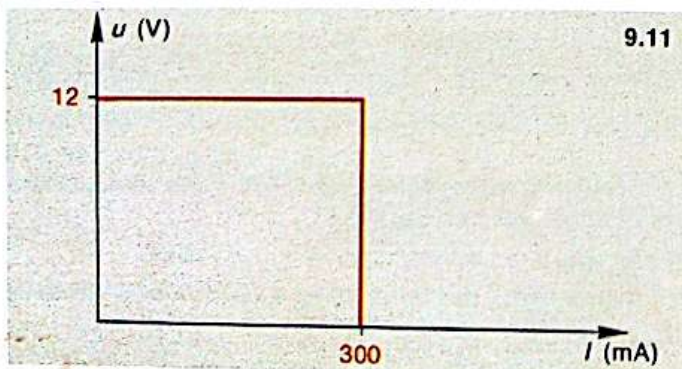
Détermination graphique d'un point de fonctionnement

9.11 La caractéristique d'une alimentation stabilisée est schématisée ci-dessous. On branche à ses bornes un conducteur ohmique de résistance R ajustable.

1/ Quelle est l'intensité débitée et la tension aux bornes de l'alimentation si R = 120 Ω? si R = 30 Ω? Peut-on court-circuiter sans danger les bornes d'une telle alimentation?

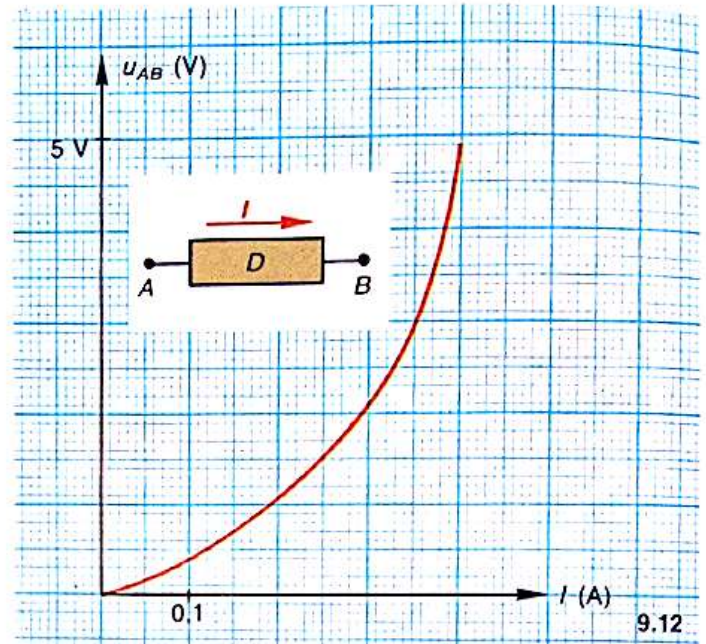
2/ Déterminer pour quelles valeurs de R :

- a/ la tension aux bornes de l'alimentation est constante;
- b/ l'intensité du courant débité est constante.



9.11

9.12 On a tracé la caractéristique intensité-tension d'un dipôle (A, B) symétrique. Aux bornes de ce dipôle, on branche un générateur linéaire de f.é.m. 5 V et de résistance interne 10 Ω.

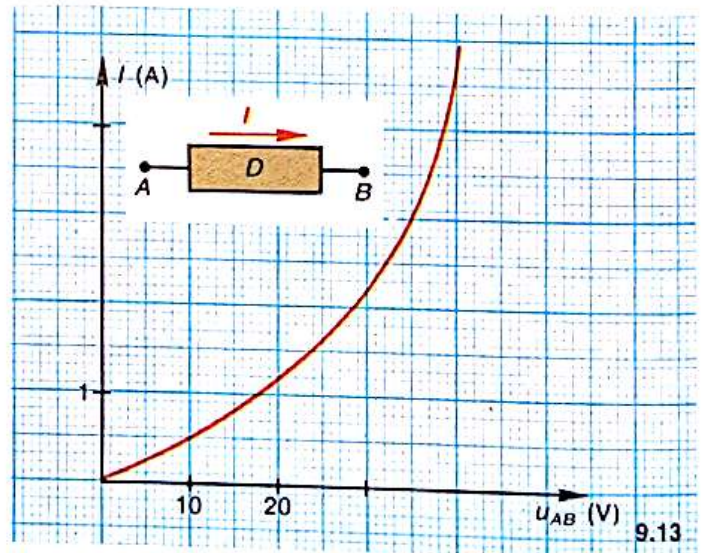


9.12

1/ Représenter la caractéristique du générateur dans le même système d'axes.

2/ En déduire le point de fonctionnement du circuit.

9.13 La figure ci-dessous représente la caractéristique tension-intensité d'un dipôle (A, B) symétrique. Aux bornes de ce dipôle, on branche un générateur linéaire de f.é.m. 30 V et de résistance interne 6 Ω.



9.13

1/ Trouver la relation qui existe entre la tension u aux bornes du générateur et l'intensité I du courant débité. Tracer la caractéristique tension-intensité de ce générateur dans le même système d'axes.

2/ Déterminer le point de fonctionnement du circuit.

9.14 Afin de tracer la caractéristique d'une lampe de poche (A, B), dipôle symétrique, on relève les mesures ci-après :

u (V)	0	0,05	0,1	0,2	0,5	0,6	1,5	2	2,5	4
I (mA)	0	24	36	61	81	100	132	155	175	227

1/ Tracer la caractéristique de cette lampe. On portera u en ordonnées et I en abscisses.

2/ Cette lampe est branchée aux bornes d'un générateur dont la caractéristique est linéaire; sa f.é.m. est $E = 4$ V, sa résistance interne 20Ω . Déterminer graphiquement l'état de fonctionnement de la lampe, c'est-à-dire la tension à ses bornes et l'intensité qui la traverse.

9.15 La caractéristique d'une pile (P, N) peut être tracée à l'aide des couples de mesures suivants :

u_{PN} (V)	6	5	4	3	2
I (A)	0	0,1	0,2	0,3	0,4

Cette pile est branchée aux bornes d'un conducteur ohmique de résistance $R = 20 \Omega$ et de puissance maximale 5 W.

1/ Tracer la caractéristique (intensité-tension) de la pile.

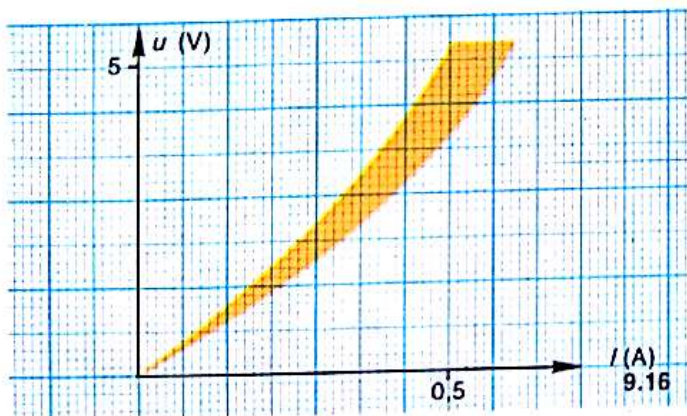
2/ Tracer sur le même graphique la caractéristique du conducteur ohmique.

3/ En déduire le point de fonctionnement. Ces deux dipôles sont-ils bien adaptés?

Adaptation de dipôles

9.16 On a acheté un lot d'ampoules sur lequel est inscrit (4,8 V; 500 mA). Pour tenir compte des tolérances de fabrication, on a tracé non pas une ligne représentant la caractéristique de chaque lampe mais une zone, de telle sorte que l'on ait de grandes chances de trouver la caractéristique d'une des lampes dans cette zone.

1/ Que signifient les inscriptions portées sur le culot?



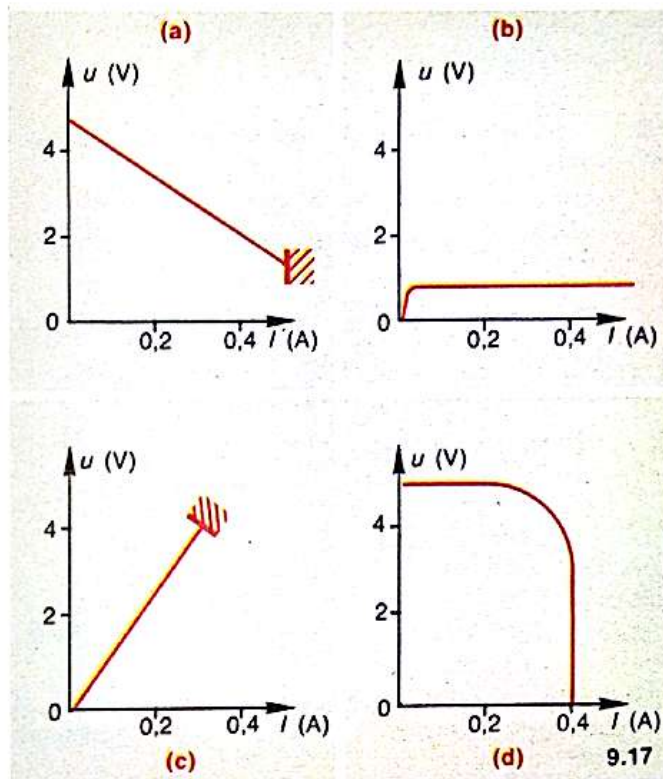
2/ On veut déterminer le point de fonctionnement de chacune de ces lampes. On branche pour cela successi-

vement chaque lampe aux bornes d'une pile. Cette pile, lorsqu'elle débite, a ses caractéristiques qui varient au cours du temps. On peut admettre que sa résistance interne r reste constante, égale à $1,4 \Omega$, alors que sa f.é.m. varie de 4,6 V à 3,8 V après un usage modéré discontinu. Déterminer graphiquement la zone correspondante aux points de fonctionnement de toutes les lampes du lot.

9.17 La figure ci-dessous montre les caractéristiques de quatre dipôles a, b, c, d . Indiquer :

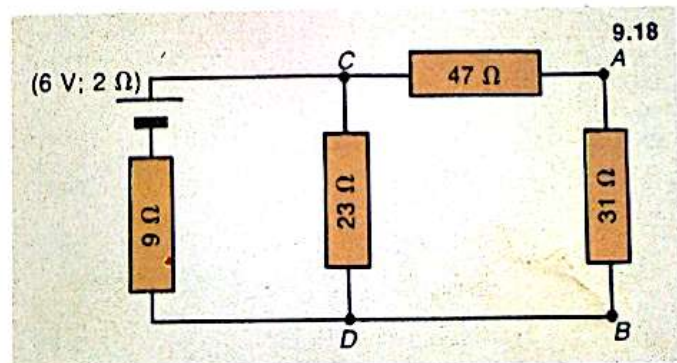
1/ les dipôles actifs; les dipôles passifs;

2/ les dipôles passifs pouvant être branchés sur les dipôles actifs.



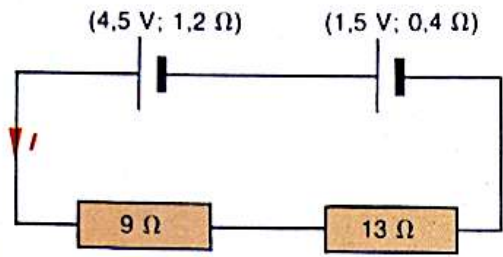
Loi de Pouillet

9.18 Le circuit ci-dessous comporte un générateur linéaire et des conducteurs ohmiques. En expliquant la démarche utilisée, déterminer la tension u_{AB} .



9.19 On a réalisé le circuit schématisé ci-dessous, où les générateurs sont des générateurs linéaires.

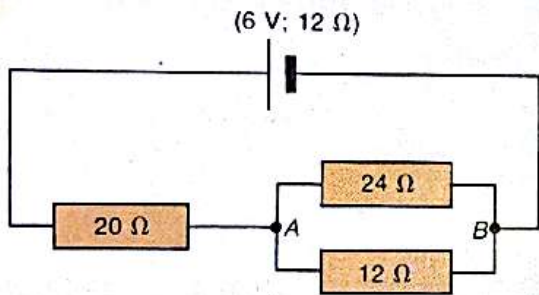
- 1/ Calculer l'intensité I du courant qui circule dans le circuit.
- 2/ Calculer la tension aux bornes de chaque dipôle.



9.19

9.20 Dans le circuit schématisé ci-dessous, déterminer :

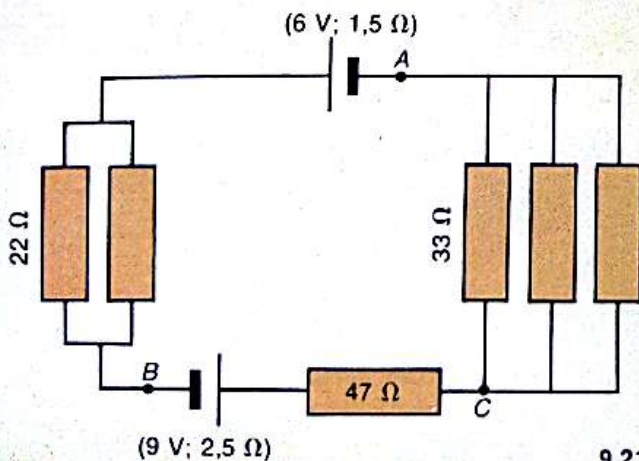
- 1/ L'intensité du courant qui traverse le générateur.
- 2/ La tension U_{AB} et les intensités dans chaque conducteur ohmique.



9.20

9.21 On étudie le circuit représenté ci-dessous; il comporte des générateurs linéaires et des conducteurs ohmiques.

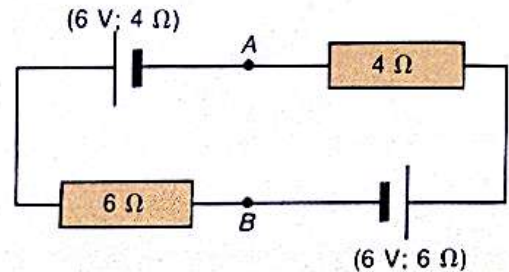
- 1/ Remplacer les conducteurs ohmiques en parallèle par des conducteurs ohmiques équivalents.
- 2/ Déterminer le sens et l'intensité du courant qui traverse chaque générateur.
- 3/ Calculer l'intensité dans chaque conducteur ohmique.
- 4/ Déterminer les tensions U_{AC} , U_{BC} et U_{AB} .



9.21

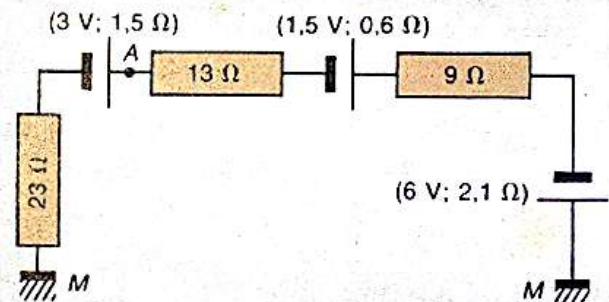
9.22 Le circuit ci-dessous comprend deux générateurs linéaires et deux conducteurs ohmiques.

- 1/ Déterminer le sens et l'intensité du courant dans le circuit.
- 2/ Calculer la tension U_{AB} .
- 3/ On place un fil de court-circuit entre A et B; quelle est l'intensité du courant qui circule dans ce fil?



9.22

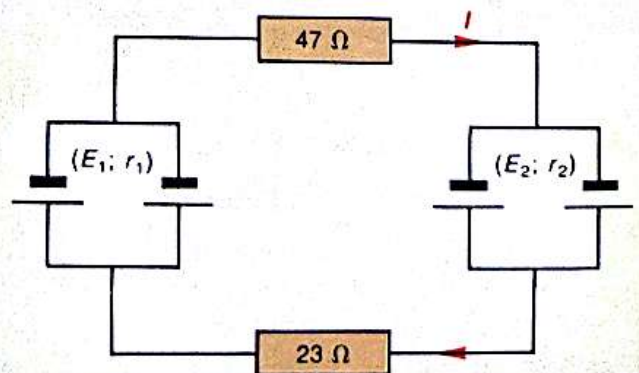
9.23 Un circuit avec masse est constitué par des générateurs linéaires et des conducteurs ohmiques. Calculer l'intensité qui circule dans chaque dipôle. Déterminer la tension entre le point A et le point M (masse du circuit).



9.23

9.24 Le circuit ci-dessous comprend deux types de générateurs en parallèle : (6 V; 1,8 Ω) et (9 V; 2,4 Ω).

- 1/ Remplacer chaque groupe de générateurs par leur générateur équivalent.
- 2/ Calculer l'intensité I dans les conducteurs ohmiques et les intensités qui traversent chaque générateur.



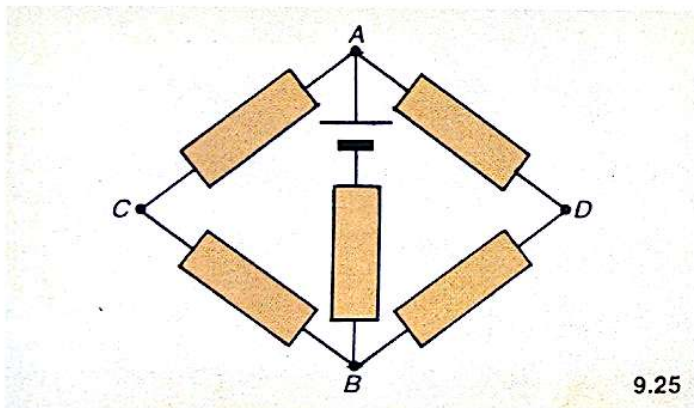
9.24

9.25 Le circuit ci-contre comporte cinq conducteurs ohmiques identiques de résistance $R = 47 \Omega$; le générateur a une f.é.m. de 12 V et une résistance interne négligeable.

1/ Déterminer le sens et l'intensité du courant qui traverse chaque dipôle.

2/ Calculer la tension u_{DC} et la tension u_{AB} .

3/ Si on met un fil de jonction entre C et D , les intensités dans les dipôles sont-elles modifiées?



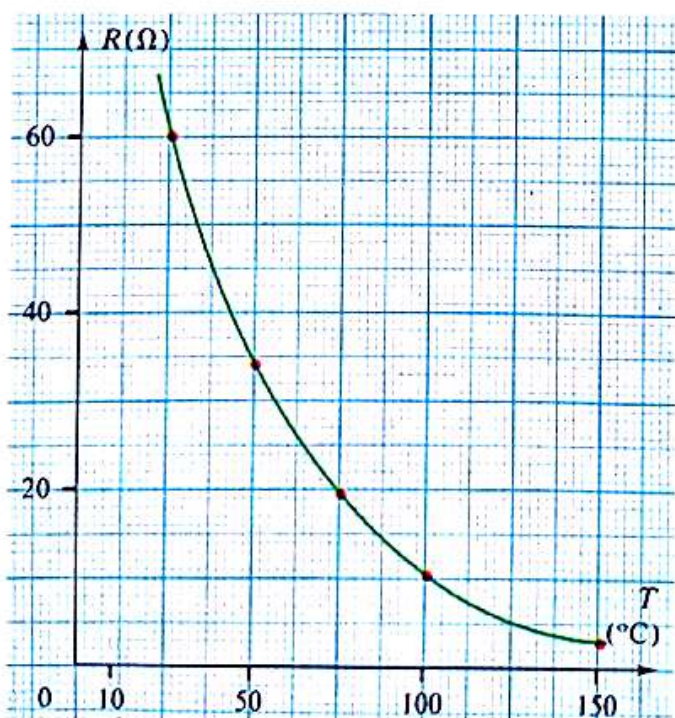
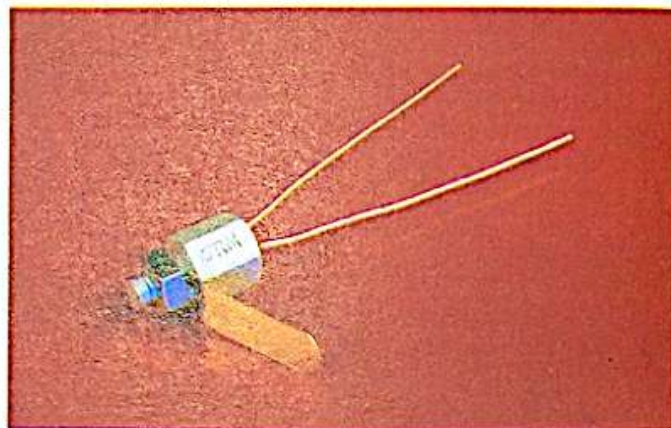
10.

Quelques montages électroniques simples

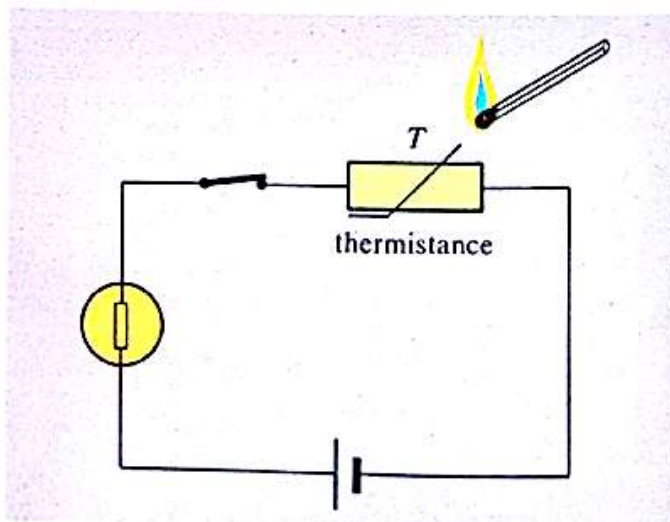
10.1 les thermistances (C.T.N.)

Une thermistance est un conducteur ohmique dont la résistance R décroît (*fig. 1*) très rapidement lorsque la température croît (Coefficient de Température Négatif). Nous pouvons l'utiliser comme un *capteur* sensible à la température.

Réalisons une chaîne électronique simple schématisée par la figure 2. Lorsqu'on chauffe avec une allumette la plaque métallique sur laquelle est vissée la thermistance, la lampe témoin s'allume : nous venons de réaliser un détecteur d'incendie rudimentaire.



1. La résistance d'une thermistance décroît rapidement avec la température.



2. En élevant la température de la CTN, on diminue sa résistance : l'intensité du courant augmente et la lampe brille.

Application 1 :

La lampe du circuit de la figure 2 brille normalement pour une intensité de 0,3 A et une tension de 3 V (valeurs nominales).

1/ En utilisant le graphique de la figure 1 ou celui de la figure 3, déterminer la tension aux bornes du générateur pour que la lampe brille normalement lorsque la température de la thermistance est 100 °C.

2/ Que peut-on prévoir lorsque la température de la thermistance n'est plus que 25 °C, sachant que le générateur maintient toujours la même tension entre ses bornes? Quelle est la valeur maximale prévisible de l'intensité? La lampe brille-t-elle alors?

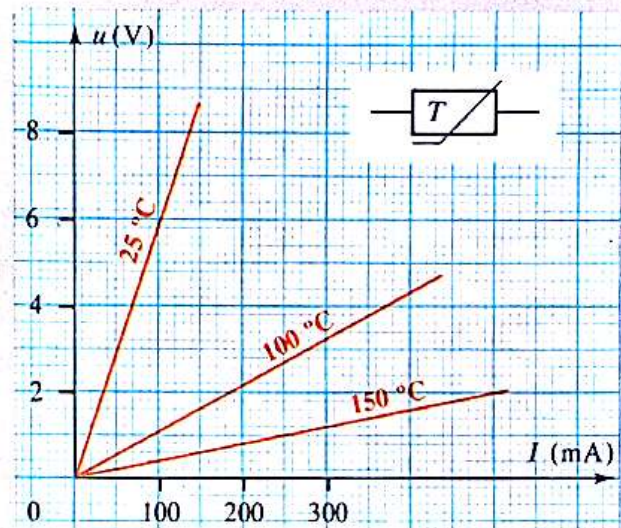
1/ Si la lampe est traversée par un courant de 0,3 A, il en est de même pour la C.T.N. associée en série. Le graphique montre qu'à 100 °C, $R = 10 \Omega$, de sorte que la tension aux bornes de la C.T.N. est 3 V ($U = R \cdot I = 10 \cdot 0,3 = 3$ V).

Le générateur doit donc maintenir une tension de 6 V, soit 3 V pour la lampe et 3 V pour la C.T.N.

2/ A 25 °C, la résistance de la C.T.N. devient 60 Ω . Si la C.T.N. était seule, sous une tension de 6 V, l'intensité du courant serait 100 mA. Or la lampe associée en série résiste de concert au

passage du courant; l'intensité ne peut être qu'inférieure à 100 mA.

La lampe ne brille plus.



3. Caractéristique intensité-tension d'une thermistance. A une température donnée, la caractéristique est une droite; la pente de cette droite décroît lorsque la température croît. A 25 °C : $R = 60 \Omega$; à 100 °C : $R = 11 \Omega$; à 150 °C : $R = 4 \Omega$.

10.2 les photorésistances

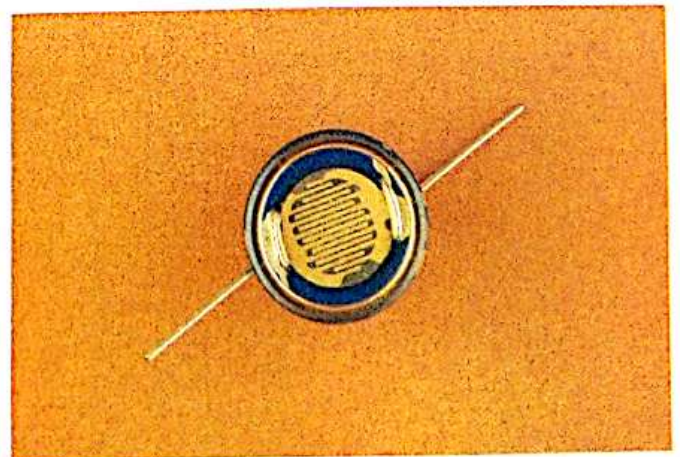
Une photorésistance (photo 4) est un conducteur ohmique dont la résistance est sensible à la lumière.

Dans l'obscurité, une photorésistance se comporte presque comme un isolant : sa résistance est alors très élevée, de 1 à 10 millions d'ohms. Lorsqu'elle est éclairée, sa résistance diminue considérablement et ne vaut plus qu'une centaine d'ohms environ.

L'un des défauts des photorésistances est l'importance de leur temps de réponse, c'est-à-dire leur lenteur à passer d'une valeur de résistance à une autre lorsque l'éclairage varie.

Par ailleurs, les photorésistances ne supportent que des courants de faible intensité (quelques dizaines de milliampères pour une puissance de 1 watt), trop faible pour

faire fonctionner directement un dispositif d'utilisation (lampe, sonnerie...).



4. Photorésistance.

Une photorésistance peut être incluse dans le circuit d'alimentation d'un relais (voir fiche technique page 101) ou dans un montage électronique; elle y joue le rôle de détecteur de lumière.

Ainsi, dans le montage de la figure 5, la lampe s'éteint lorsqu'on éclaire la photorésistance, s'allume lorsque la photorésistance est dans l'obscurité.

Application 2 :

Dans le montage de la figure 5, la résistance du relais vaut $R_2 = 200 \Omega$; ce dernier se déclenche lorsque l'intensité du courant est supérieure ou égale à 15 mA. Calculer la tension que le générateur doit maintenir entre ses bornes pour que le relais s'enclenche lorsque la résistance de la photorésistance n'est plus que $R_1 = 100 \Omega$ (pleine lumière).

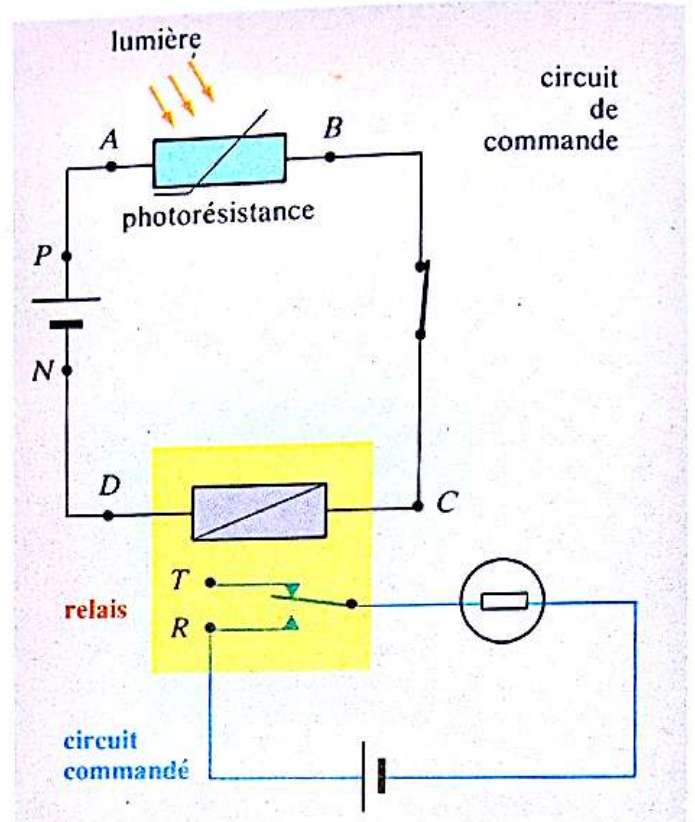
La tension aux bornes du générateur est égale à la somme des tensions aux bornes des éléments du circuit série :

$$u_{PN} = u_{AB} + u_{CD}$$

Or $u_{AB} = R_1 \cdot I$ et $u_{CD} = R_2 \cdot I$. On obtient :

$$u_{PN} = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I = (200 + 100) \times 15 \cdot 10^{-3} = 4,5 \text{ V.}$$

Une pile 4,5 V peut convenir.

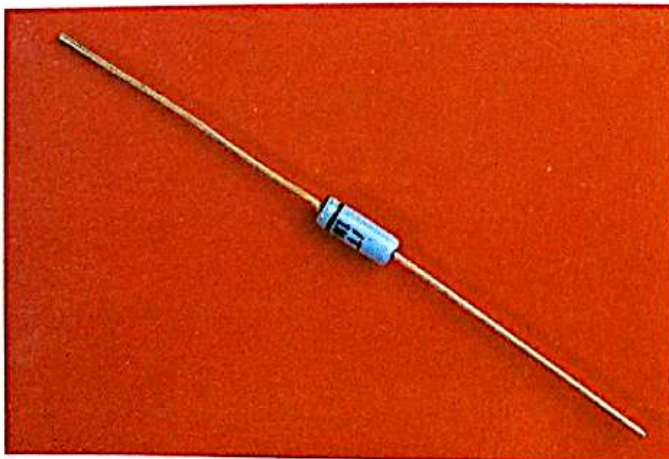


5. Lampe commandée par photorésistance. Si un courant assez intense passe dans le circuit de commande, l'électro-aimant du relais attire la languette (en vert) vers le contact T, et le circuit commandé est ouvert. Sinon la languette appuie sur le contact R, et le circuit commandé est fermé.

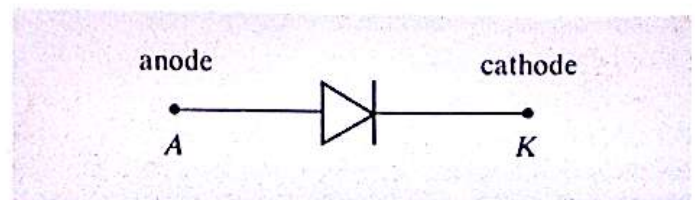
10.3 les diodes à jonction

10.3.1 Caractéristiques

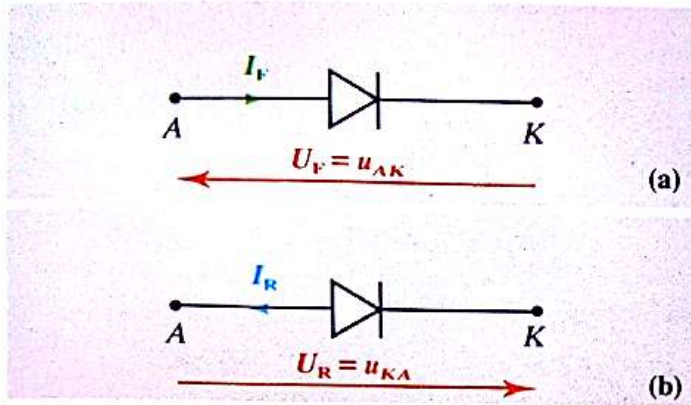
Ce composant électronique a l'aspect d'un petit cylindre (fig. 6) marqué d'un anneau indiquant la « cathode » K. Une diode est constituée à l'aide de matériaux semi-conducteurs, tels le silicium et le germanium (cf. document du chapitre 1).



6. Diode et sa représentation symbolique. (Remarquer l'anneau qui indique la cathode.)



Le sens A vers K, qui correspond à la sortie du courant par la cathode K (fig. 7 a), est appelé *sens direct* (ou sens passant) et l'intensité du *courant direct* notée I_F (de l'anglais Forward). L'intensité du *courant inverse*, de K vers A (fig. 7 b), est notée I_R (Reverse).



7. Sens direct (a) et sens inverse (b) d'une diode.

Les électroniciens ont l'habitude de représenter sur un même graphique (fig. 8) la caractéristique directe ($U_F; I_F$) et la caractéristique inverse ($U_R; I_R$).

Étudions d'abord le cas d'une diode idéale :

1. Sens direct : La tension $U_F = U_{AK}$ est positive. Il existe une valeur U_S (tension de seuil) telle que :

- Si $U_F < U_S$: l'intensité I_F est nulle; la diode est « bloquée ».
- Si $U_F > U_S$: la diode conduit le courant; elle est « passante »; la tension à ses bornes se fixe à la valeur U_S . L'intensité du courant est limitée par le circuit extérieur.

Pour éviter de détruire la diode, il faut veiller à ne pas dépasser la valeur I_{FM} , valeur maximale d'intensité directe indiquée par le fabricant.

La tension de seuil U_S dépend du matériau utilisé pour fabriquer la diode (0,6 V pour le silicium, 0,2 V pour le germanium).

2. Sens inverse : la tension $U_R = U_{KA}$ est positive ($U_{AK} < 0$). La diode se comporte pratiquement comme un isolant (interrupteur ouvert). L'intensité du courant inverse est pratiquement nulle : la diode est bloquée.

Pour éviter de détruire le composant, il ne faut pas dépasser une tension inverse maximale U_{RM} .

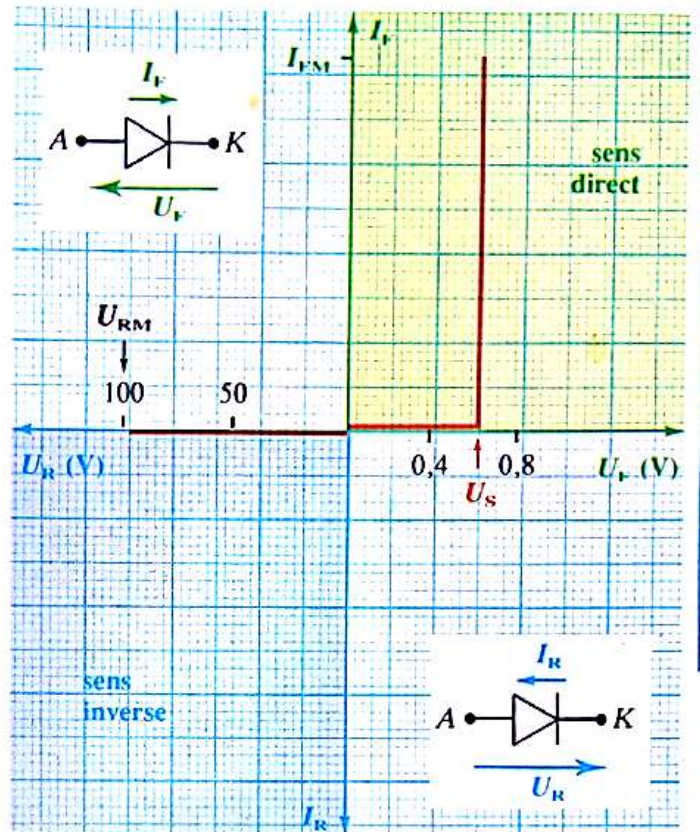
Examinons maintenant le cas d'une diode réelle (fig. 9).

1. Sens direct : lorsque la diode est passante ($U_F > U_S$), la tension U_F augmente très légèrement avec l'intensité I_F du courant.

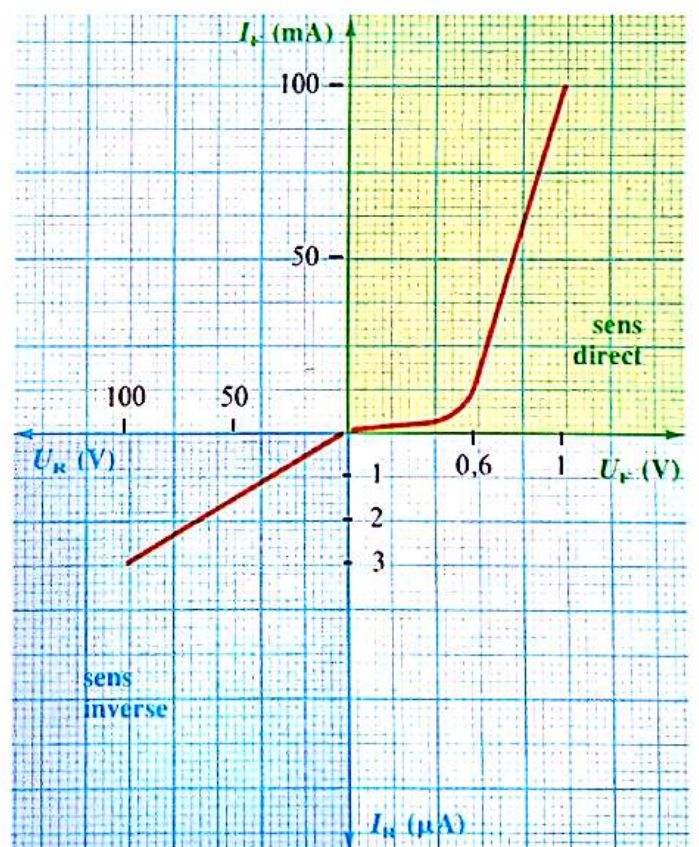
2. Sens inverse : il existe un courant inverse mais d'intensité I_R toujours très faible (quelques μA ou nA).

En conclusion :

- Une diode est un dipôle dissymétrique qui ne conduit pratiquement le courant que dans un seul sens : le sens direct; la tension à ses bornes reste alors pratiquement égale à la tension de seuil.



8. Caractéristiques directe et inverse d'une diode idéale. Remarquer qu'une échelle différente est adoptée pour graduer l'axe U_F et l'axe U_R .



9. Caractéristiques d'une diode réelle. Remarquer que les axes ne sont pas gradués avec la même échelle. En particulier l'intensité I_R du courant inverse reste ici inférieure à 3 μA ($3 \cdot 10^{-6} A$), même sous une tension de 100 V.

10.3.2 applications des diodes à jonctions

De la forme de la caractéristique d'une diode, nous pouvons déduire de nombreuses applications importantes, entre autres :

- **Redresseur de courant alternatif** (voir document en fin de chapitre) : Associée en série dans un circuit alimenté par un générateur de courant alternatif, une diode ne laisse passer le courant que dans un sens (une seule « alternance »). En associant plusieurs diodes, on réalise un « pont à diodes » qui permet de redresser les deux

« alternances » d'un courant alternatif. En complétant le montage avec un condensateur (autre composant électronique), on peut obtenir un courant pratiquement continu.

- **Protection de certains circuits** : Certains circuits intégrés (composants électroniques élaborés) ne peuvent être traversés par un courant que dans un sens; un courant inverse intense les détruit. Une diode est alors branchée pour bloquer un éventuel courant inverse, et protéger le circuit intégré.

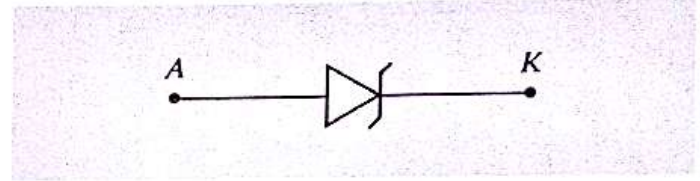
10.4 les diodes Zener

10.4.1 caractéristiques

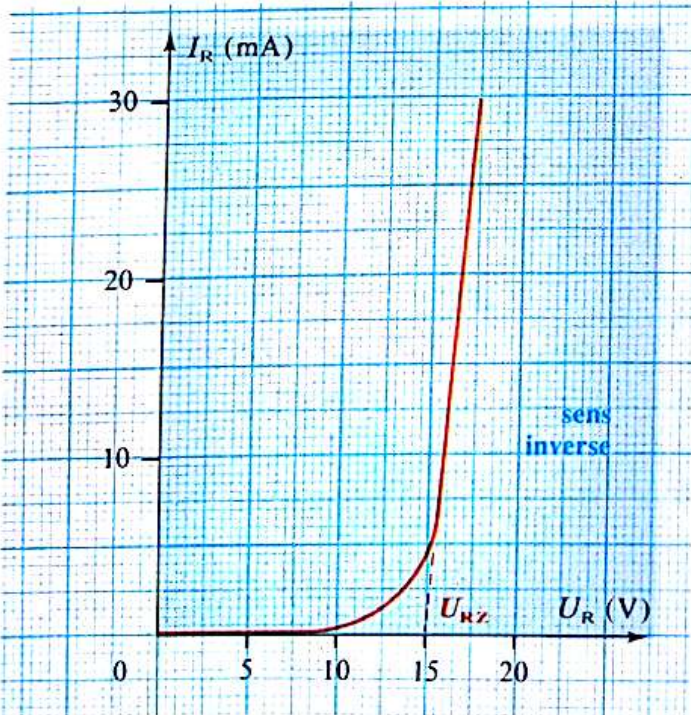
Une diode Zener est une diode à jonction, mais qui peut conduire le courant en sens inverse si la tension $U_R = U_{KA}$ est suffisante. Précisément, elle est surtout utilisée en sens inverse.

Étudions d'abord le cas d'une diode Zener idéale (fig. 11) :

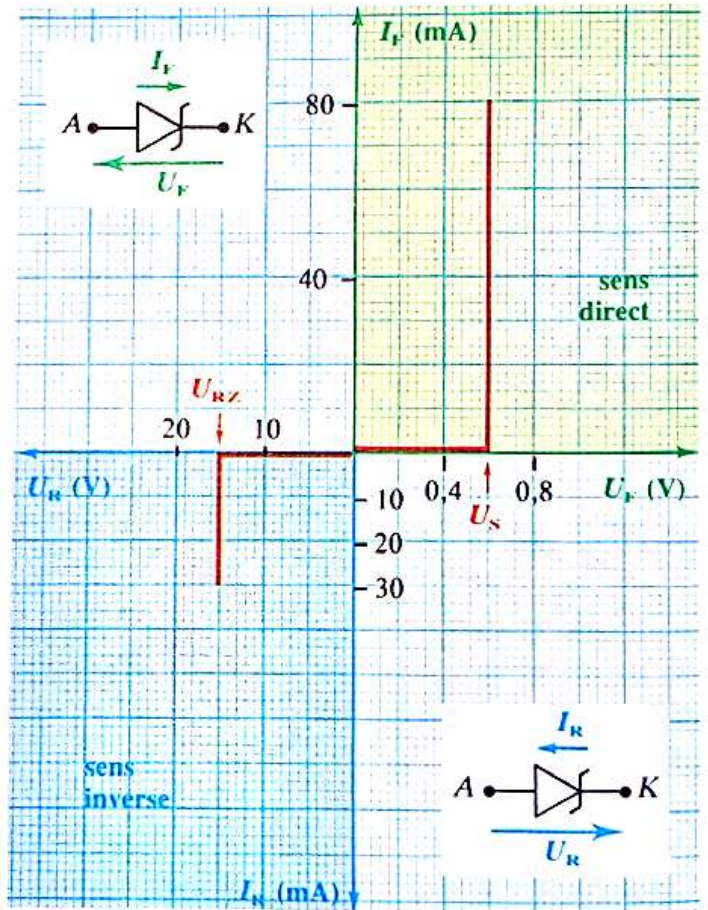
1. **Sens direct** : la tension $U_F = U_{AK}$ est positive. La caractéristique est celle d'une diode à jonction classique.
2. **Sens inverse** : la tension $U_R = U_{KA}$ est positive ($U_{AK} < 0$). Il existe une valeur U_{RZ} (tension Zener) telle que :
 - Si $U_R < U_{RZ}$: l'intensité I_R est nulle; la diode est « bloquée ».
 - Si $U_R \geq U_{RZ}$: la diode conduit le courant; elle est « passante »; la tension à ses bornes se fixe à la valeur U_{RZ} et l'intensité I_R du courant est limitée par le circuit.



10. Représentation symbolique d'une diode Zener.



12. Caractéristique inverse d'une diode Zener réelle.



11. Caractéristiques d'une diode Zener idéale. Là encore, les axes ne sont pas gradués à la même échelle.

Dans le cas d'une diode Zener réelle, dans le sens inverse qui nous intéresse et lorsque $U_R \geq U_{RZ}$, la tension U_R augmente légèrement avec l'intensité I_R du courant (fig. 12).

En sens inverse, l'intensité du courant inverse ne doit pas excéder une valeur maximale I_{RM} donnée par le fabricant.

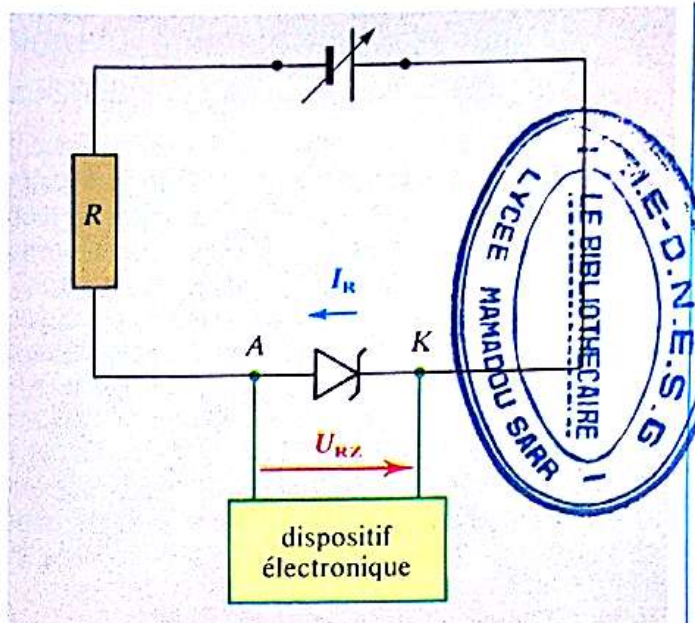
La tension Zener dépend du mode de fabrication de la diode; elle varie d'environ 2 volts à quelques dizaines de volts. Certaines diodes ont même une tension Zener réglable.

10.4.2 applications

Signalons deux applications possibles :

- **Régulateur de tension.** Analysons le montage de la figure 13. La diode Zener est traversée par un courant inverse : la tension à ses bornes u_{KA} reste pratiquement constante, égale à U_{RZ} , et ce même si le générateur G provoque des fluctuations de l'intensité I_R du courant inverse. Cette tension u_{KA} , constante, pourra être utilisée pour faire fonctionner un dispositif qui nécessite une tension stable.

- **Protection.** Si aux bornes d'un dispositif électronique la tension ne doit pas dépasser une tension maximale U_M , il suffit de choisir une diode Zener de tension $U_{RZ} = U_M$, que l'on placera en parallèle aux bornes de ce dispositif.



13. Quand l'intensité I_R du courant fluctue, la tension u_{KA} , elle, reste quasiment constante, égale à U_{RZ} . Le dispositif électronique bénéficie d'une tension stabilisée.

Application 3 :

Si une diode Zener est parfois utilisée pour protéger un dispositif des variations de tension, il arrive qu'il faille protéger la diode Zener elle-même : c'est le but du dispositif de la figure ci-dessous.

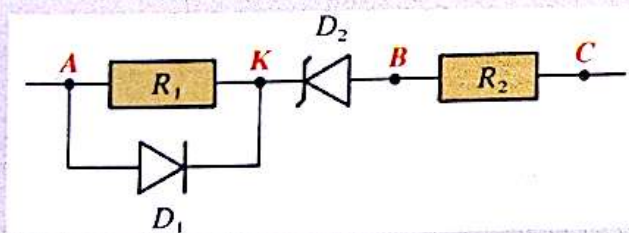
Caractéristiques de la diode à jonction D_1 :

$$I_{FM} = 1 \text{ A}; \quad U_S \approx 0 \text{ V}; \quad U_{RM} = 100 \text{ V}.$$

Caractéristiques de la diode Zener D_2 :

$$I_{FM} = 100 \text{ mA}; \quad U_S \approx 0 \text{ V}; \quad U_{RZ} = 8 \text{ V}; \quad I_{RM} = 60 \text{ mA}.$$

Les deux diodes sont considérées comme idéales. La tension u_{AC} appliquée aux bornes du circuit vaut soit $+12 \text{ V}$, soit -12 V .



1/ La tension u_{AC} vaut $+12 \text{ V}$. Quel est le rôle de D_1 ? Calculer la résistance R_2 minimale pour que la diode D_2 soit protégée. La diode D_1 est-elle alors protégée elle aussi?

2/ La tension u_{AC} vaut -12 V . Calculer la résistance R_1 pour que la diode D_2 soit protégée.

1/ Avec $u_{AC} > 0$, la diode D_1 laisse passer le courant, et puisque $U_S \approx 0$, elle se comporte comme un court-circuit à l'égard du conducteur ohmique R_1 . La diode Zener D_2 , elle, est branchée en sens inverse; si $u_{KB} > 8 \text{ V}$, un courant I la traversera de K vers B .

Appliquons la loi d'additivité des tensions :

$$u_{AC} = u_{AK} + u_{KB} + u_{BC};$$

or $u_{AK} = U_S \approx 0 \text{ V}$ et $u_{KB} = U_{RZ} = 8 \text{ V}$, d'où :

$$u_{BC} = u_{AC} - U_{RZ} = 12 - 8 = 4 \text{ V}.$$

Cette tension, aux bornes d'un conducteur ohmique, obéit à la loi d'Ohm :

$$u_{BC} = R_2 \cdot I.$$

Pour que la diode Zener soit protégée, l'intensité I du courant ne doit pas excéder $I_{RM} = 60 \text{ mA}$; on en déduit la valeur minimale de R_2 :

$$R_2 = \frac{u_{BC}}{I_{RM}} = \frac{4}{60 \cdot 10^{-3}} \approx 67 \Omega.$$

Quant à la diode D_1 ($I_{FM} = 1 \text{ A}$), elle ne risque rien avec un courant de 60 mA .

2/ Avec $u_{CA} > 0$ ($u_{AC} < 0$), la diode D_1 est bloquée; le courant circule dans R_1 . La tension u_{BK} aux bornes de la diode Zener D_2 , passante, est nulle ($U_S \approx 0$). L'additivité des tensions donne :

$$u_{CA} = u_{CB} + u_{BK} + u_{KA},$$

avec $u_{BK} = U_S \approx 0$. Appliquons la loi d'Ohm :

$$u_{CA} = R_2 \cdot I + R_1 \cdot I = (R_1 + R_2) \cdot I.$$

L'intensité I du courant doit rester inférieure ou égale à $I_{RM} = 60 \text{ mA}$; on en déduit la valeur minimale de la somme $R_1 + R_2$:

$$R_1 + R_2 = \frac{u_{CA}}{I_{RM}} = \frac{12}{6 \cdot 10^{-2}} = 200 \Omega,$$

et $R_1 = 200 - 67 = 133 \Omega$.

Pour vous entraîner, reprenez cet exercice en prenant pour chaque diode $U_S = 0,7 \text{ V}$.

10.5 les diodes électroluminescentes (D.E.L.)

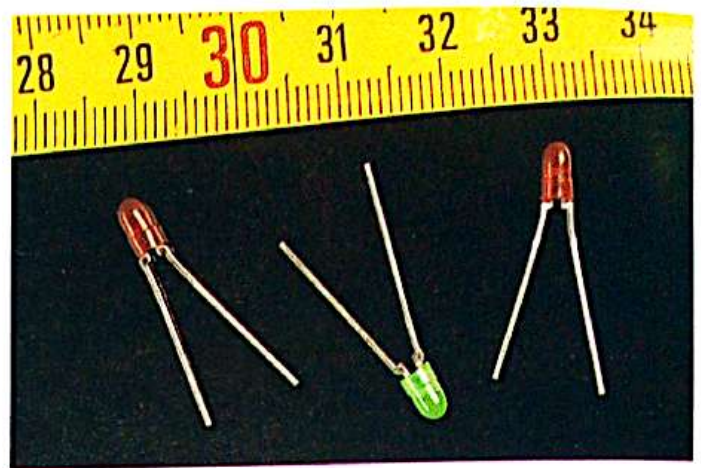
Ce sont des diodes semblables aux diodes à jonction, mais le matériau qui les constitue émet de la lumière lorsqu'elles sont traversées par un courant dans le sens direct. La lumière émise est dite « froide », comme celle émise par les vers luisants (phénomène de fluorescence). Les D.E.L. (ou L.E.D., abréviation américaine) rouges sont les plus anciennes mais on en fabrique actuellement des vertes, des orangées; certaines émettent même des rayons infrarouge invisibles mais détectables par des capteurs spécifiques.

Très utilisées dans les montages électroniques comme voyants lumineux, elles servent également à transformer des signaux électriques en signaux lumineux dans le domaine des télécommunications par fibre optique.

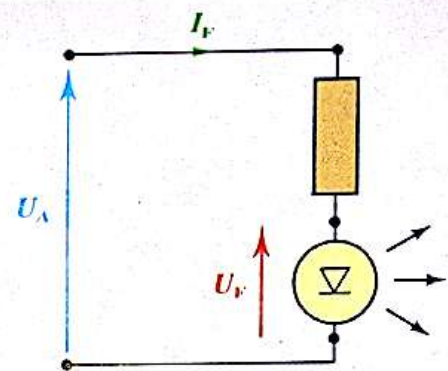
Les D.E.L. nécessitent pour fonctionner un courant d'intensité beaucoup plus faible (environ 10 mA) que les ampoules ordinaires et durent beaucoup plus longtemps (10 ans pratiquement); elles sont peu sensibles aux vibrations mécaniques.

Le constructeur indique l'intensité du courant direct et la tension U_F correspondante, pour un fonctionnement normal.

Il convient de ne pas dépasser les valeurs limites I_{FM} et U_{FM} d'intensité et de tension. C'est pourquoi une D.E.L. est pratiquement toujours associée en série avec un conducteur ohmique de protection (fig. 15).



14. Diodes électroluminescentes.



DEL rouge : $U_F = 1,8 \text{ V}$,
tension d'alimentation $U_A \geq 1,8 \text{ V}$.

DEL verte ou jaune : $U_F = 2,5 \text{ V}$,
tension d'alimentation $U_A \geq 2,5 \text{ V}$.

On se limite à $I_F \approx 15 \text{ mA}$; protection : $R_P = \frac{U_A - U_F}{I_F}$.

15. DEL avec conducteur ohmique de protection.

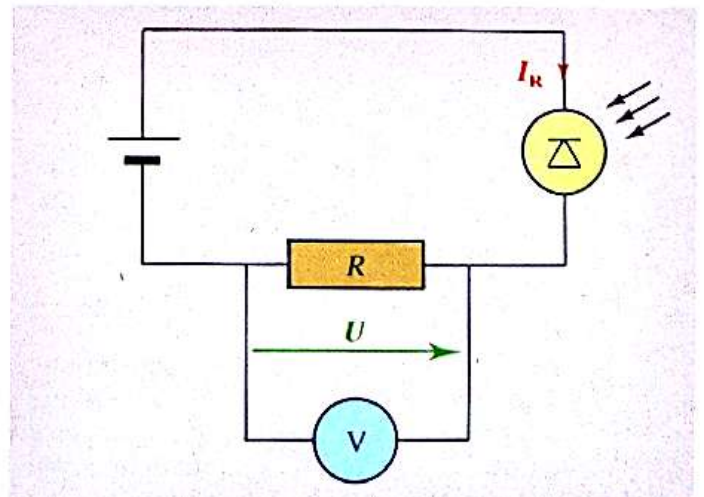
10.6 les photodiodes

Une photodiode est une diode au silicium utilisée en sens inverse, donc normalement bloquée. Mais lorsqu'elle reçoit de la lumière, tout se passe comme si elle avait une fuite de courant. Les photodiodes sont surtout sensibles à la lumière rouge et aux infrarouges.

L'intensité du courant inverse présente l'intérêt d'être proportionnelle à la puissance lumineuse reçue. Cette intensité est très faible (quelques dizaines de nanoampères), et il est nécessaire d'utiliser un amplificateur.

Une photodiode permet donc de transformer un signal lumineux en un signal électrique. Son temps de réponse est très court.

Les photodiodes sont très employées dans les télécommunications par fibre optique.



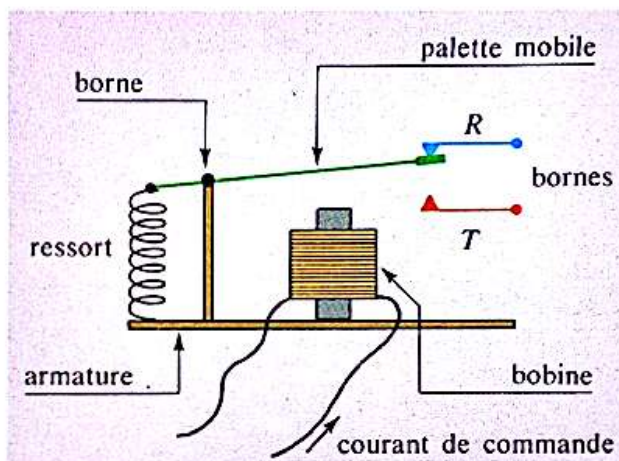
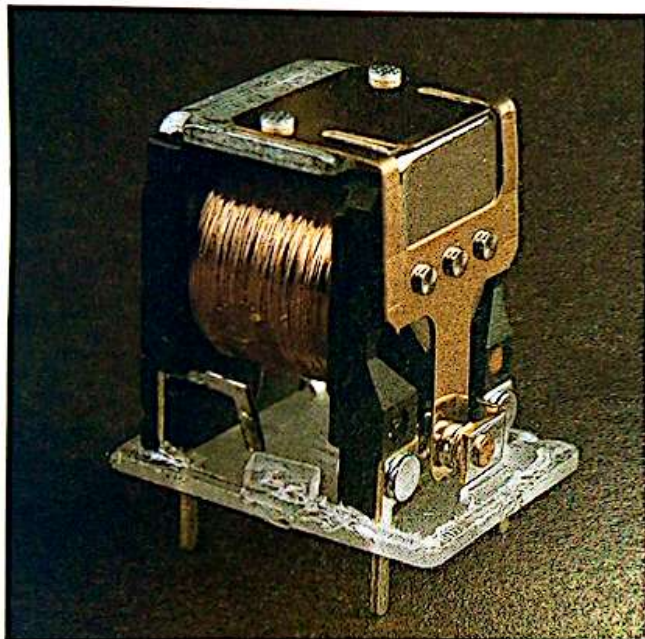
16. La tension $U = R \cdot I_R$ est proportionnelle à la puissance lumineuse reçue par la photodiode.

Fiche technique

les relais

• Fonctionnement

Un relais simple comporte deux contacts : un contact repos *R* et un contact travail *T*. Lorsque la bobine (fil de cuivre émaillé) est traversée par un courant, un phénomène d'aimantation attire la palette mobile sur le contact *T*. Sans courant, l'aimantation disparaît et le ressort tire la palette mobile vers le contact *R*.

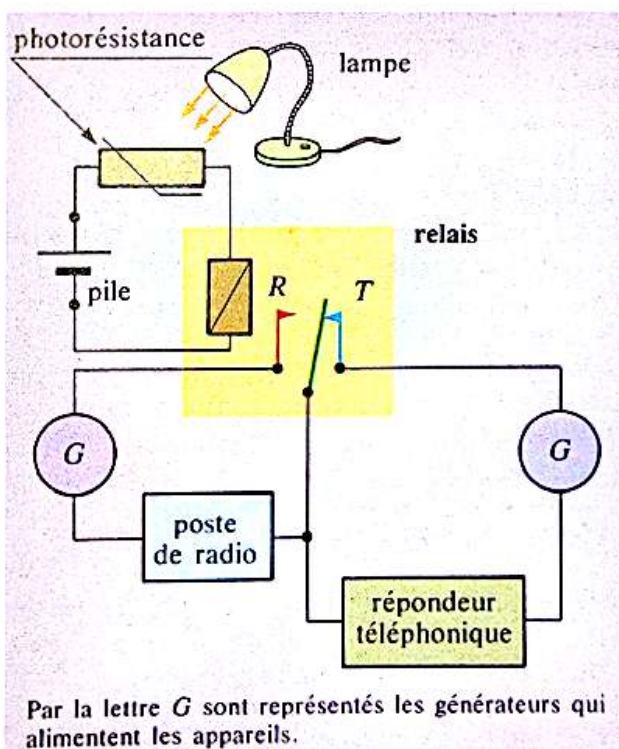


L'emploi des relais est répandu dans les montages électriques ou électroniques.

Comme le montre le montage de la figure 5 page 96, le relais peut jouer le rôle d'interrupteur, commandé par un faible courant (le courant qui laisse passer la photorésistance) et ouvrant ou fermant un circuit parcouru par un courant intense (celui qui alimente la lampe).

Le montage de la figure ci-contre utilise les deux contacts *R* et *T*.

En allumant la lumière (reçue par la photorésistance), le relais s'enclenche; il provoque la mise en marche du poste de radio et coupe le circuit du répondeur automatique du téléphone (par exemple). A l'extinction de la lumière, la radio s'arrête, le répondeur est remis en marche.



Par la lettre *G* sont représentés les générateurs qui alimentent les appareils.

• Aspects techniques

La bobine fonctionne en général sous une tension faible et avec un courant peu intense : généralement moins de 12 volts et quelques dizaines de milliampères. Vérifier les indications du fabricant.

Le circuit commandé peut comporter des appareils de grande puissance; un courant intense circule alors dans les contacts. Le constructeur donne le

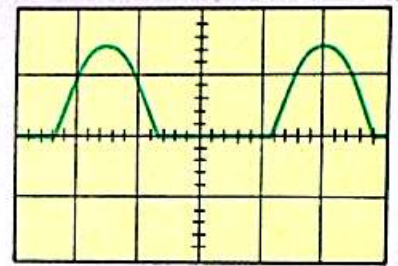
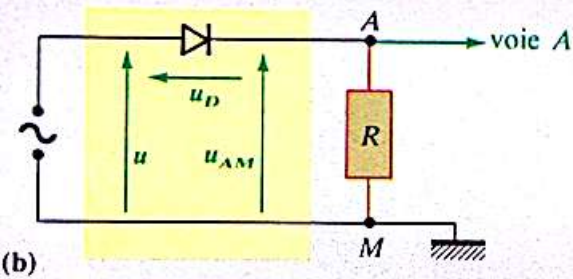
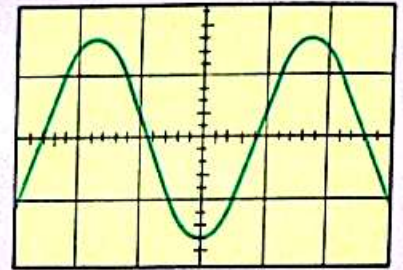
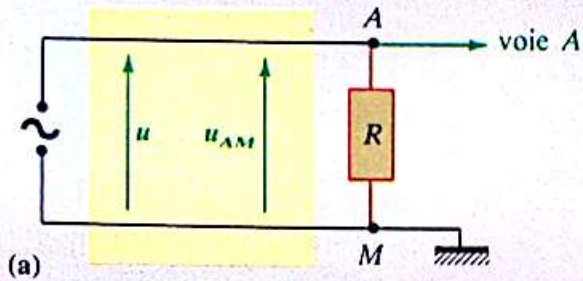
pouvoir de coupure des contacts; en particulier :

- l'intensité de coupure (2 A par exemple) : intensité maximale qui peut être coupée par les contacts;
- la tension de coupure (125 V par exemple) : tension maximale qui peut être appliquée entre les contacts.

Redressement des tensions alternatives Fabrication d'un générateur de courant continu

Aux bornes d'un conducteur ohmique branché à un générateur qui délivre une tension u sinusoïdale, observons la tension à l'aide d'un oscillographe en mode balayage : le spot décrit une

« sinusoïde » (a) ; u est alternativement positive ou négative. Interposons dans le circuit une diode à jonction (b) supposée idéale ($U_S \approx 0$).



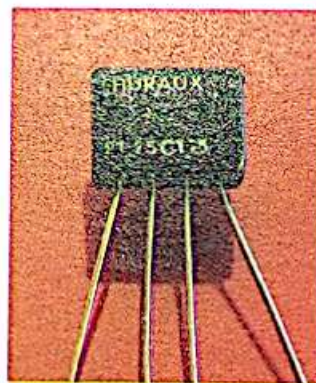
- La diode conduit : $u_D = 0$; le courant I circule de A vers M dans le conducteur ; $u_{AM} = u > 0$.
- La diode ne conduit pas : $u_D < 0$; $u_{AM} = 0$; $u_D = u < 0$.

La diode a pour effet de supprimer la partie négative de la tension u délivrée par le générateur : aux bornes du conducteur ohmique R , on a une tension dite **redressée monoalternance**.

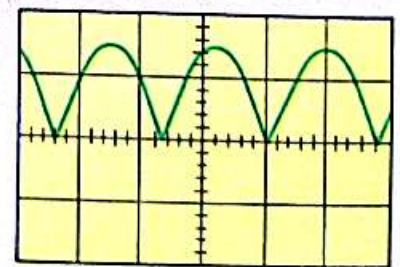
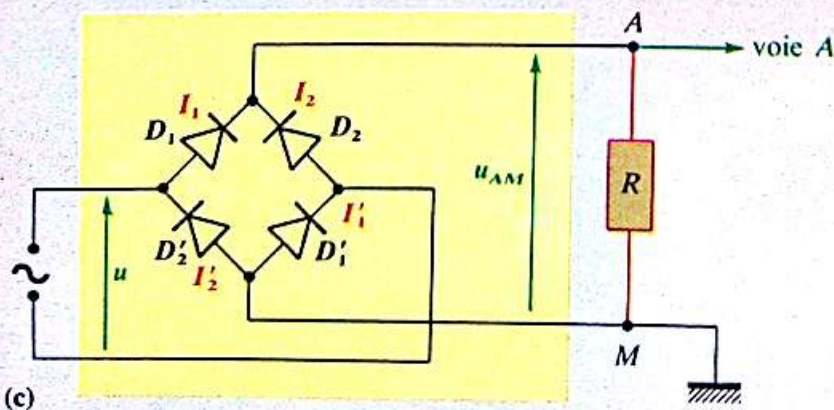
On améliore le dispositif en montant quatre diodes « en pont » selon le schéma (c) :

- si $u > 0$, les diodes D_2 et D_2' sont bloquées, $I_2 = 0$, le courant I_1 circule à travers les diodes D_1 et D_1' ; dans R , le courant $I = I_1$ va de A vers M et $u_{AM} \approx u > 0$;
- si $u < 0$, les diodes D_1 et D_1' sont bloquées, $I_1 = 0$, le courant I_2 circule dans les diodes D_2 et D_2' ; dans R , le courant va toujours de A vers M : $u_{AM} \approx -u > 0$.

La tension de sortie u_{AB} est toujours positive : on a obtenu un **redressement double alternance**.

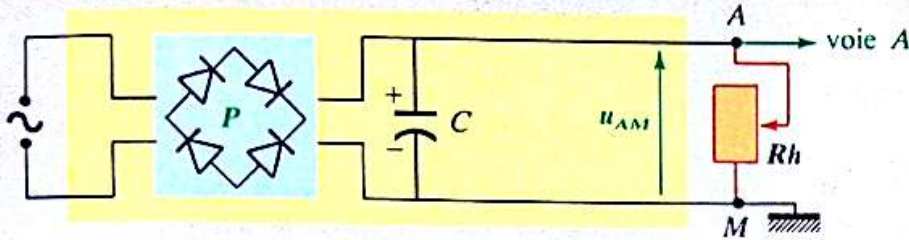


Sur le marché, on dispose de ponts faits de diodes hermétiquement scellées et moulées dans une matière plastique.

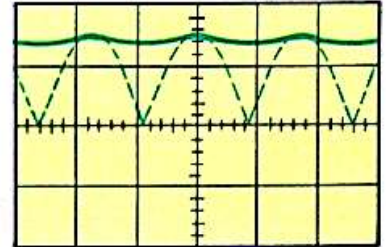


L'utilisation d'une telle tension continue *pulsée*, par exemple pour charger les batteries ou faire fonctionner les moteurs à courant continu, est limitée. Le plus souvent, on a besoin d'une tension constante semblable à celle délivrée par un accumulateur. Il existe plusieurs procédés pour faire disparaître les ondulations d'une tension continue pulsée.

Le plus simple est de mettre en parallèle sur la sortie du pont un condensateur (d) (composant électronique qui sera étudié dans les classes ultérieures); à l'oscillographe, nous observons aux bornes de *R* une tension pratiquement constante; mais l'ondulation résiduelle est encore sensible pour des valeurs de *R* équivalente à la résistance d'un récepteur radio par exemple.



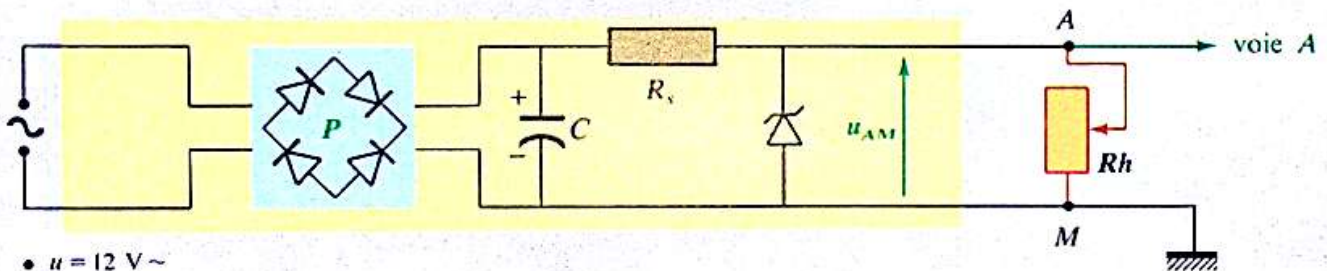
- $u = 12\text{ V} \sim$
- condensateur électrochimique C de $470\ \mu\text{F}$ ou de $1\ \mu\text{F}$. Selon le condensateur, l'ondulation est plus ou moins importante
- rhéostat de $10\ \text{k}\Omega$
- P : composant MDA 920-3



(d)

On améliore la qualité de ce générateur de tension « constante » en plaçant à la sortie une diode Zener associée à une résistance R_s (e). La tension u_{AB} reste constante, égale à U_{RZ} , en dépit des variations du courant dans R ou de la tension de la source.

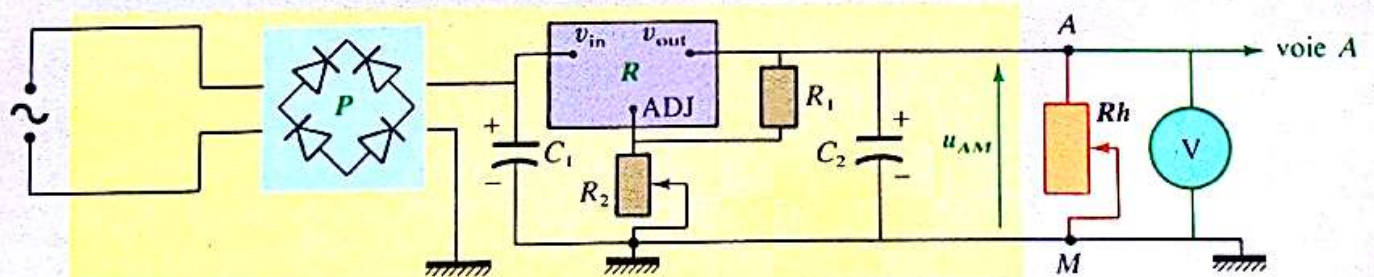
En combinant les diodes Zener et divers composants électroniques sur une même pastille, les fabricants produisent des *régulateurs de tension intégrés* à trois broches. Le schéma (f) est celui d'un véritable générateur de courant continu.



- $u = 12\text{ V} \sim$
- Zener SD10 : $U_{RZ} = 10\text{ V}$
- $R_s = 50\ \Omega$

Lorsque R_h varie, la tension est constante, égale à 10 V .

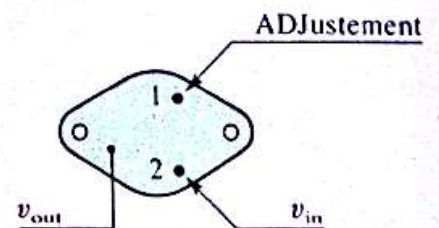
(e)



- $u = 15\text{ V} \sim$
- R : régulateur LM350 (276-1776)
- $R_2 = 5\ \text{k}\Omega$; $R_1 = 120\ \Omega$
- condensateurs électrochimiques : $C_1 = 0,1\ \mu\text{F}$; $C_2 = 1\ \mu\text{F}$.

Lorsque R_h varie, la tension délivrée u_{AM} reste particulièrement constante; elle dépend du réglage de R_2 :

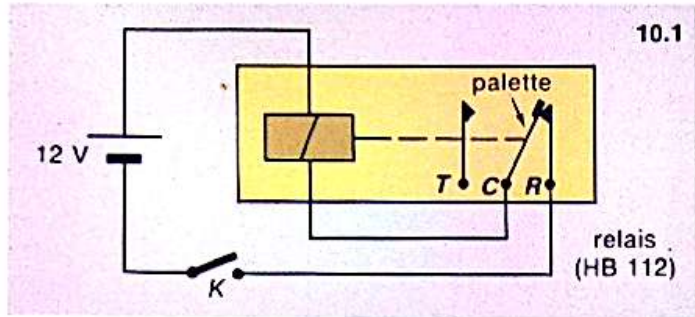
$$u_{AM} \approx 1,25 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right), \text{ en volts.}$$



(f)

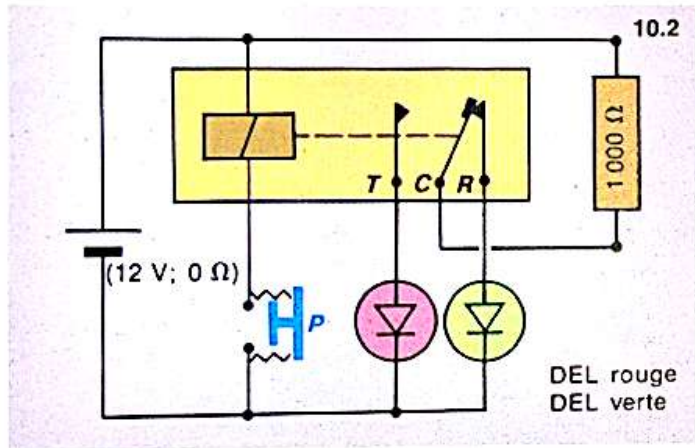
Montages comportant des relais

10.1 Expliquer pourquoi la palette mobile du relais se met à vibrer comme une sonnette lorsqu'on ferme l'interrupteur K.



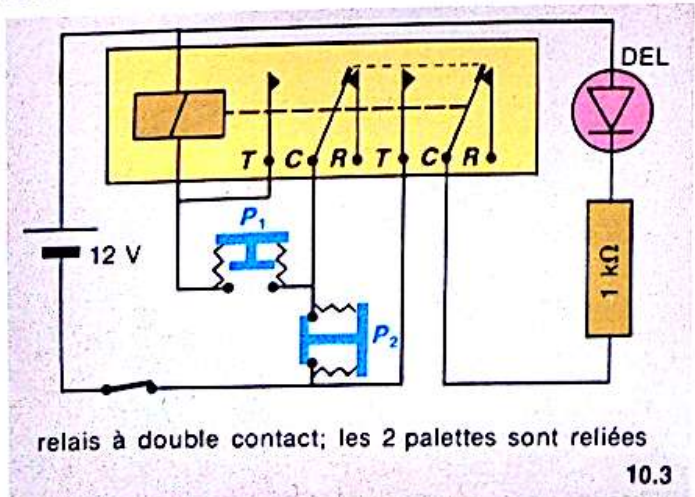
10.2 P est un interrupteur poussoir : au repos le circuit est ouvert; poussé, le circuit est fermé.

1/ Indiquer, selon la position de P, si les diodes électroluminescentes sont allumées ou non.



2/ Lorsque la diode rouge s'allume, la tension directe à ses bornes est de 1,8 V; qu'elle est l'intensité du courant qui la traverse? Lorsque la diode verte s'allume, la tension directe à ses bornes est de 2,5 V; calculer l'intensité du courant qui la traverse.

10.3 P₁ et P₂ sont des interrupteurs poussoir de nature différente. P₁ ferme le circuit lorsqu'il est maintenu poussé; P₂, au contraire, ouvre le circuit lorsqu'il est maintenu poussé. Initialement, P₁ et P₂ sont au repos et la DEL est éteinte.



relais à double contact; les 2 palettes sont reliées

1/ Un quidam marche sur P₁ caché sous le tapis d'un passage surveillé : P₁ est alors enfoncé puis relâché. Qu'advient-il lorsque P₁ est enfoncé? Puis lorsque P₁ est relâché? Pourquoi peut-on dire que le montage a « mémorisé » le passage du quidam sur le tapis?

2/ Que doit faire le responsable du passage surveillé pour éteindre la DEL et rendre le dispositif à nouveau opérationnel?

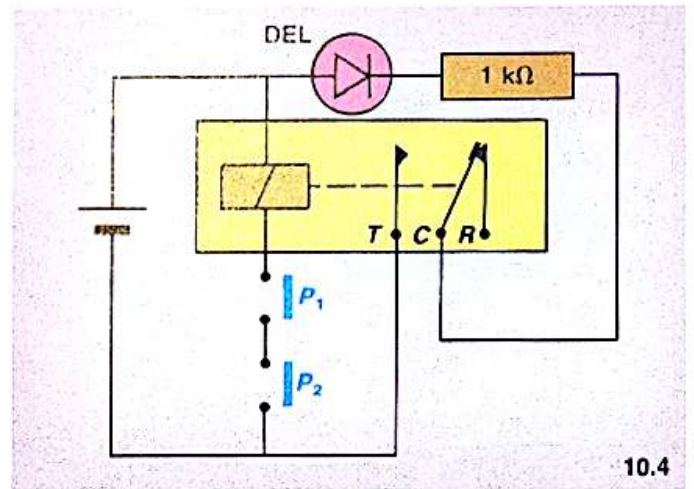
Tables de vérité

10.4 P₁ et P₂ sont deux boutons poussoirs : au repos, ils ouvrent le circuit; appuyés ou en position de travail, ils ferment le circuit.

1/ Préciser l'état de la DEL dans le montage ci-après (éteinte ou allumée) selon les cas suivants :

- a/ P₁ repos; P₂ repos.
- b/ P₁ repos; P₂ travail.
- c/ P₁ travail; P₂ repos.
- d/ P₁ travail; P₂ travail.

2/ On attribue la valeur 1 à l'état allumé de la diode et la valeur 0 à l'état éteint. De même, pour les poussoirs, on attribue la valeur 0 à l'état repos et la valeur 1 à l'état travail. Établir la table de vérité.



3/ On appelle fonction « produit », ou encore fonction ET, une fonction qui est à l'état 1 si et seulement si les deux variables dont elle dépend sont à l'état 1. La notation correspond à la relation $D = P_1 \cdot P_2$, ce qui se lit : « D égale P₁ ET P₂ ». D = 1 lorsqu'on a simultanément P₁ = 1 et P₂ = 1. Le montage donné permet-il d'illustrer une telle fonction ET?

4/ Trouver un dispositif pratique pouvant utiliser ce type de montage.

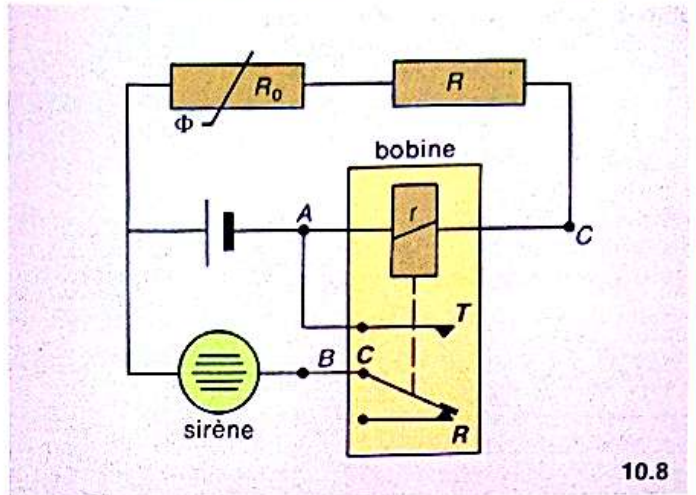
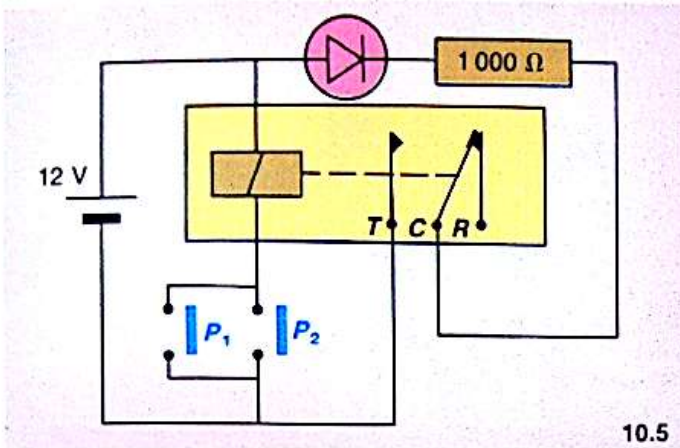
10.5 En reprenant les conventions de l'exercice précédent :

1/ Établir la table de vérité correspondant au montage ci-après.

2/ On appelle fonction « somme », ou encore fonction OU, une fonction qui est à l'état 1 si et seulement si l'une ou l'autre des deux variables dont elle dépend sont à l'état 1. On note : $D = P_1 + P_2$, ce qui se lit « D égale

P_1 OU P_2 ». $D=1$ lorsqu'on a 1 en P_1 ou en P_2 . Le montage donné traduit-il cette fonction OU?

3/ Trouver un dispositif pratique pouvant utiliser ce type de montage.



10.9 La résistance d'une CTN varie avec la température :

$\theta(^{\circ}\text{C})$	10	20	40	60	80	100	120
$R(\Omega)$	9000	5000	2000	800	400	200	100

Photorésistances et CTN

10.6 On associe en série un relais électromagnétique de résistance 300Ω , une photorésistance et un générateur de force électromotrice 12 V , de résistance interne négligeable. Pour que le relais s'enclenche, il faut que le courant qui traverse la bobine du relais ait une intensité supérieure à 7 mA . Une fois enclenché, il ne se désenclenche que si l'intensité de ce courant devient inférieure à 3 mA . Entre quelles valeurs la résistance de la photorésistance doit-elle varier pour que le relais s'enclenche, puis se désenclenche?

10.7 Les caractéristiques d'un relais sont :
 — tension d'enclenchement : $U_e = 4,4 \text{ V}$;
 — tension de désenclenchement : $U_d = 4,0 \text{ V}$;
 — résistance de la bobine : $r = 220 \Omega$.

Ce relais est commandé par une thermistance dont la résistance varie de 80Ω (température θ_1) à 250Ω (température θ_2). L'ensemble est alimenté par un générateur de f.é.m. E et de résistance interne négligeable. Comment choisir E pour que le dispositif fonctionne correctement (enclenchement à la température θ_1 et désenclenchement à la température θ_2)?

10.8 On veut utiliser une photorésistance pour déclencher une sirène de forte puissance dont le point de fonctionnement est $(24 \text{ V}; 4 \text{ A})$. La photorésistance a une résistance variant de $150 \text{ k}\Omega$ dans la pénombre à 400Ω lorsqu'elle est éclairée; l'intensité limite à ne pas dépasser est de 20 mA . Le générateur maintient une tension constante égale à 24 V .

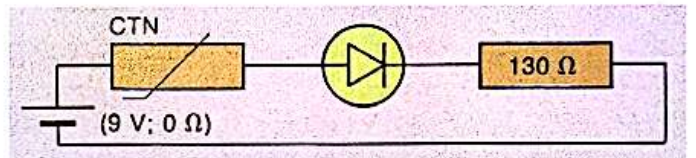
1/ Pourquoi n'est-il pas possible d'associer simplement la photorésistance et la sirène en série?

2/ On utilise un relais selon le montage schématisé ci-après. Ses tensions U_{CA} de désenclenchement U_d et d'enclenchement U_e sont respectivement $4,0 \text{ V}$ et $4,5 \text{ V}$. La résistance de la bobine est $r = 300 \Omega$. Comment choisir la résistance R du conducteur ohmique pour un fonctionnement correct du dispositif?

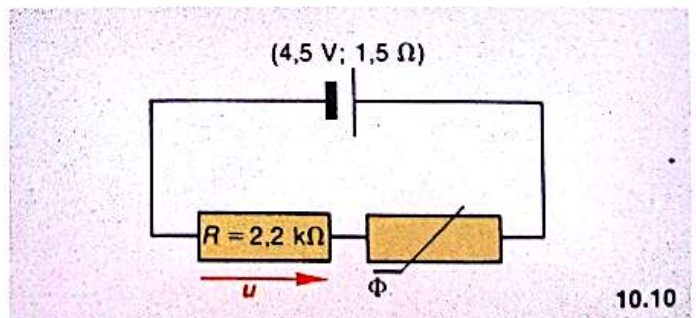
On place cette thermistance en série avec une diode électroluminescente verte; on supposera la chute de tension directe aux bornes de la diode égale à $2,5 \text{ V}$ lorsqu'elle est traversée par un courant.

1/ Calculer l'intensité qui traverse le circuit lorsque la CTN est portée à la température de 100°C .

2/ La diode commence vraiment à émettre de la lumière quand l'intensité du courant qui la traverse est de l'ordre de 5 mA . Pour environ quelle température de la CTN la diode commence-t-elle à briller?



10.10 On utilise une photorésistance dans le montage schématisé ci-dessous. Dans l'obscurité, sa résistance est de $10^6 \Omega$; fortement éclairée, sa résistance devient égale à $10^3 \Omega$. Évaluer dans chaque cas (obscurité, lumière) l'intensité du courant dans le circuit ainsi que la tension aux bornes du conducteur ohmique de résistance $2,2 \text{ k}\Omega$.



10.11 On dispose d'un générateur $(6 \text{ V}; 0 \Omega)$, d'une photorésistance dont la résistance varie de 200Ω à $10^6 \Omega$

selon l'éclairage reçu et d'une ampoule témoin dont le point de fonctionnement normal est (2 V; 10 mA). La photorésistance est placée dans un hangar, l'ampoule dans une salle de contrôle; l'ampoule est allumée lorsque le hangar est éclairé. Faire un schéma du montage. Les trois dipôles proposés sont-ils adaptés?

10.12 On admet que la résistance d'une thermistance varie linéairement en fonction de la température, sur un certain domaine de température, selon la formule :

$$R = 200(1 - 10^{-2} \cdot \theta),$$

avec R en Ω et θ en $^{\circ}\text{C}$. On branche en série cette thermistance avec un générateur et une sirène. Le générateur est une batterie d'accumulateurs (12 V; 0 Ω). La sirène est équivalente à un conducteur ohmique de résistance 20 Ω ; elle commence à fonctionner lorsque la tension à ses bornes vaut 6 V. Faire un schéma du montage et déterminer à partir de quelle température la sirène se met à hurler.

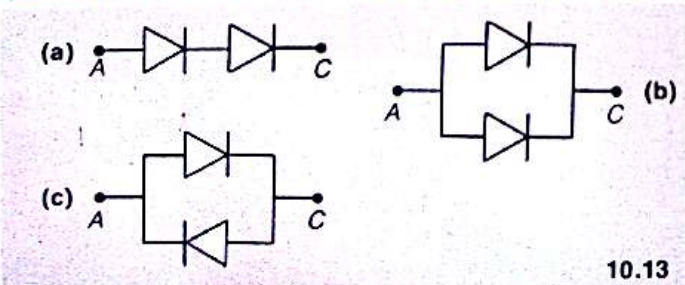
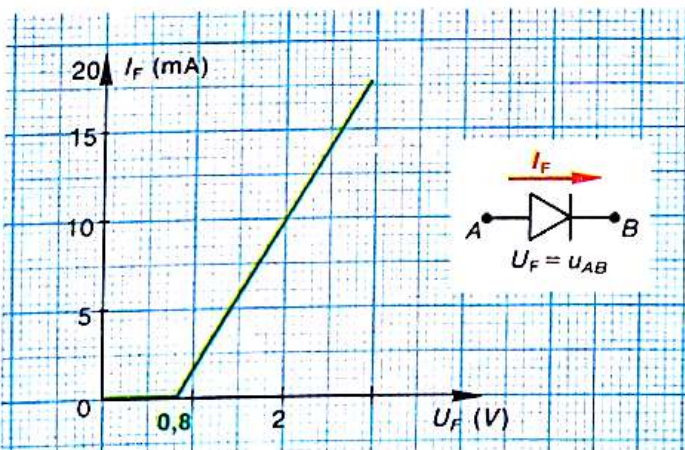
Montages avec diodes

10.13 La caractéristique d'une diode est idéalisée sur le schéma ci-après, lorsqu'elle est soumise à une tension $u_{AB} > 0$. Si $u_{AB} < 0$, le courant qui la traverse est d'intensité $I_R = 0$.

1/ Déterminer les équations de la caractéristique pour $0 < u_{AB} < 0,8$ V et $u_{AB} > 0,8$ V.

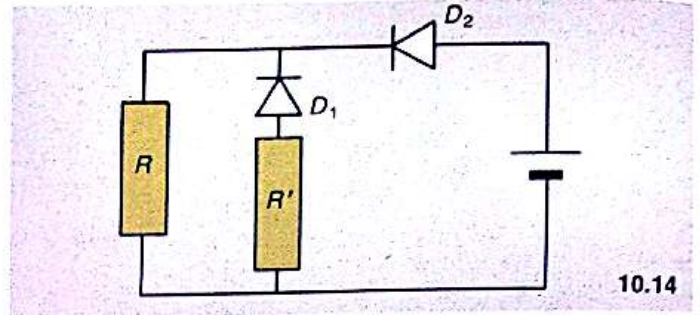
2/ On associe deux diodes identiques selon les schémas a, b et c. Déterminer dans chaque cas la relation qui existe entre l'intensité qui circule entre A et C et la tension u_{AC} lorsque $u_{AC} > 0$ et $u_{CA} > 0$.

3/ I étant le courant allant de A vers C, tracer pour $u_{AC} > 0$ la courbe $I = f(u_{AC})$.
 I' étant le courant allant de C vers A, tracer pour $u_{CA} > 0$ la courbe $I' = f(u_{CA})$.



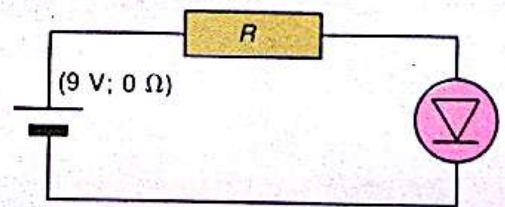
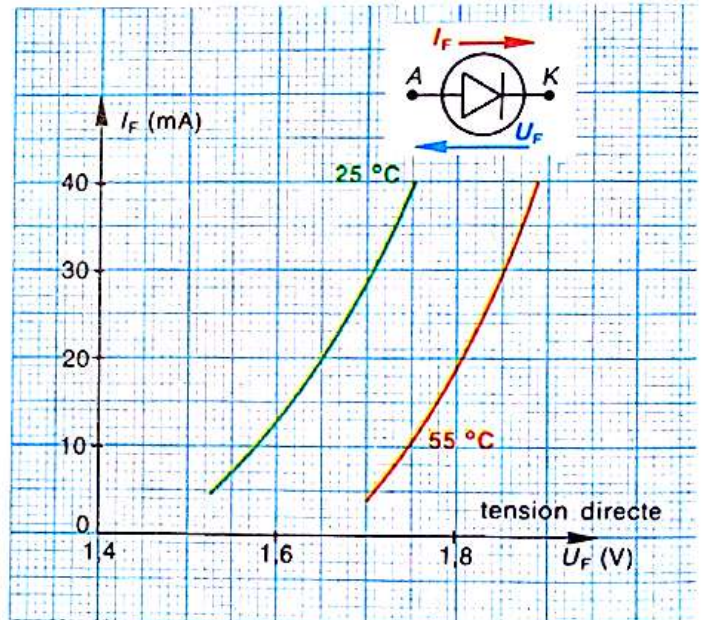
10.13

10.14 La figure représente un circuit comportant deux diodes D_1 et D_2 . R et R' sont des dipôles symétriques conducteurs. Indiquer par des flèches le sens du courant (lorsqu'il existe) dans chacun des conducteurs. Que se passe-t-il si on inverse les bornes du générateur?



10.14

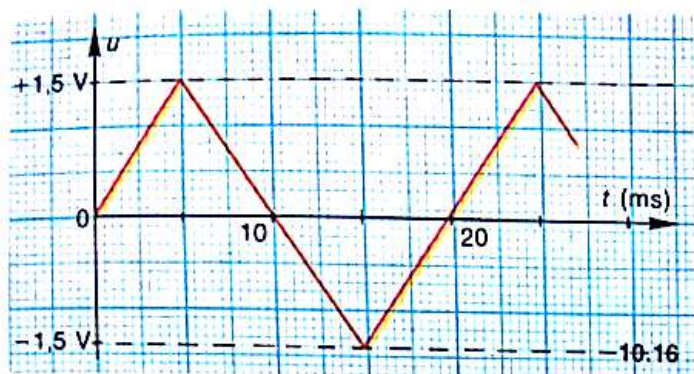
10.15 Une diode électroluminescente rouge est placée dans le circuit ci-dessous. Le constructeur donne sa caractéristique qui dépend de la température d'utilisation. Calculer, pour les températures de 25 $^{\circ}\text{C}$ et 55 $^{\circ}\text{C}$, la valeur à donner à R pour limiter le courant à 20 mA.



10.15

10.16 1/ Représenter la caractéristique tension-intensité d'une diode idéale de tension de seuil $U_S = 0,8$ V.

2/ La diode est branchée en série dans un circuit comportant un conducteur ohmique et un générateur délivrant une tension u périodique alternative dont les variations sont représentées ci-après en fonction du temps. Reproduire ce graphique. Y noter pour quelle valeur de la tension u la diode devient passante. Représenter les variations en fonction du temps de la tension u' aux bornes de la diode.



10.17 Le montage ci-après comporte un générateur de tension alternative sinusoïdale, une diode et un dipôle conducteur symétrique (E, F). La tension u_{AB} varie périodiquement de -3 V à $+3\text{ V}$.

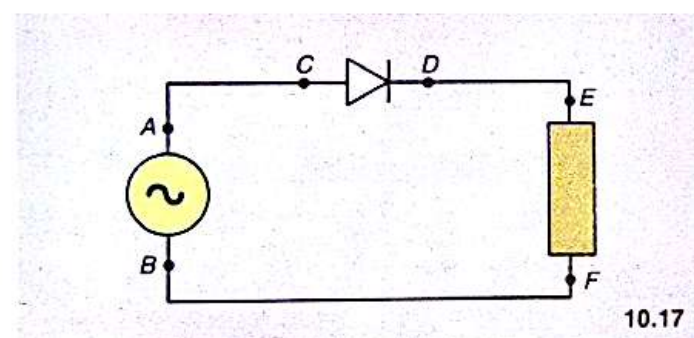
1/ Entre quelles valeurs varie périodiquement la tension u_{CD} aux bornes de la diode, supposée idéale :

a/ si la tension de seuil $U_S \approx 0\text{ V}$;

b/ si $U_S = 0,8\text{ V}$.

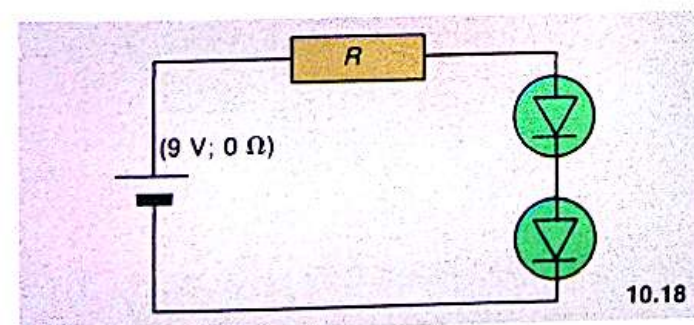
2/ Représenter graphiquement $t \mapsto u_{CD}(t)$, dans les deux cas.

3/ Représenter $t \mapsto u_{EF}(t)$.



10.17

10.18 Soit deux diodes électroluminescentes vertes en série. Lorsque le courant passe, la tension directe aux bornes de chaque diode est de $2,5\text{ V}$. Donner la valeur de la résistance R à placer dans le circuit afin que l'intensité du courant ne dépasse pas 15 mA .



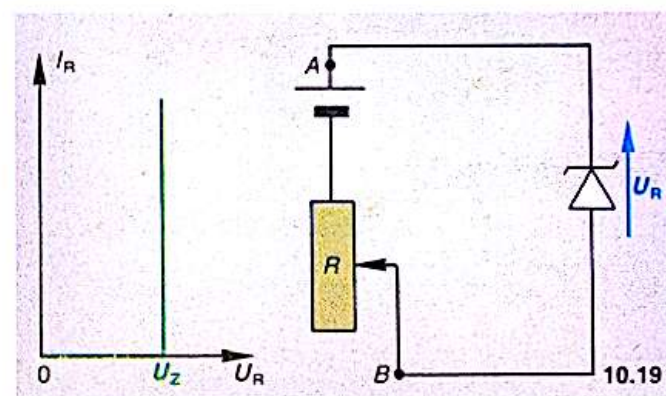
10.18

Montages avec des diodes Zener

10.19 Un générateur, de f.é.m. $E = 24\text{ V}$ et de résistance négligeable, est associé à un rhéostat dont la résistance R peut varier entre $6\ \Omega$ et $400\ \Omega$. L'ensemble, qui constitue un dipôle (A, B), est branché aux bornes d'une diode Zener idéale de tension Zener $U_Z = 6,9\text{ V}$ et ne pouvant recevoir qu'une puissance inférieure à $0,69\text{ W}$.

1/ On donne à R la valeur de $100\ \Omega$. Tracer la caractéristique du dipôle (A, B) et, sur le même graphique, celle de la diode Zener. Quel est le point de fonctionnement prévu pour le montage? La puissance alors reçue par la diode est-elle supportable?

2/ Pour quelle valeur de l'intensité du courant, la puissance reçue par la diode vaut-elle $0,69\text{ W}$? Entre quelles valeurs peut-on faire varier R pour que cette puissance ne soit pas dépassée?



10.19

10.20 Un générateur de résistance négligeable, de f.é.m. réglable entre 0 V et 20 V , est branché en série avec un conducteur ohmique de résistance R et une diode Zener idéale, de tension Zener $U_Z = 10\text{ V}$. La diode ne peut supporter un courant inverse d'intensité supérieure à 50 mA .

1/ Quelle valeur de la résistance R permet de protéger la diode Zener? On adoptera cette valeur par la suite.

2/ Tracer la caractéristique du dipôle (A, B), association du générateur et du conducteur ohmique, pour $E = 5\text{ V}$, pour $E = 12\text{ V}$, enfin pour $E = 20\text{ V}$.

3/ Sur le même graphique, tracer la caractéristique inverse de la diode.

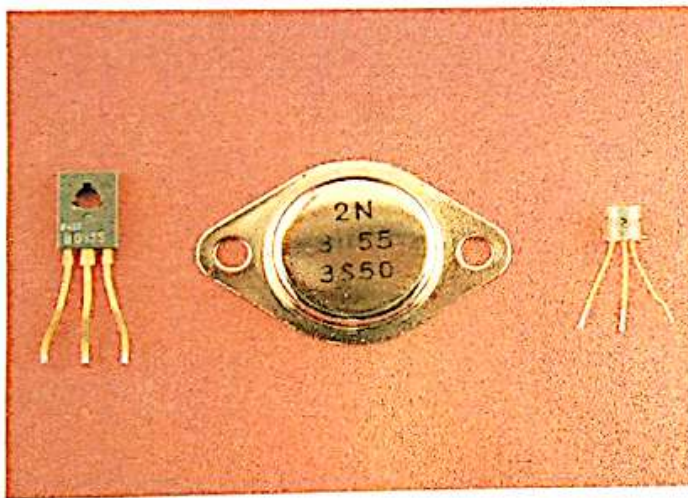
a/ Trouver le point de fonctionnement de la diode pour les différentes valeurs de E .

b/ A partir de quelle valeur E_0 de E la diode est-elle « passante »?

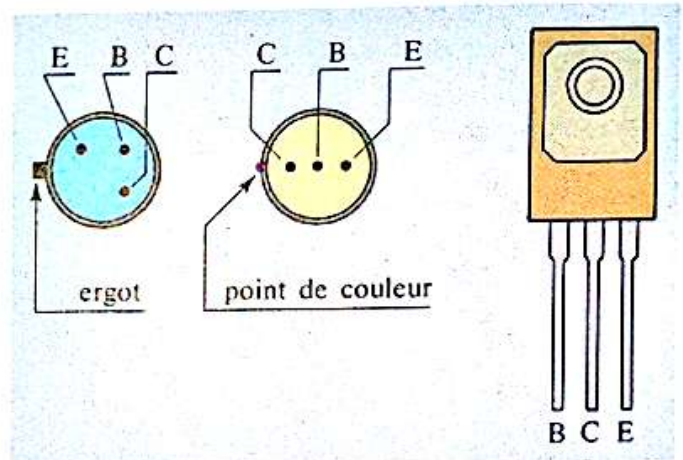
c/ Déterminer u_{AB} en fonction de E . Pourquoi dit-on que la tension u_{AB} est stabilisée?

4/ Calculer l'intensité I du courant en fonction de E .

Le transistor et quelques applications



1. Quelques transistors.



2. Connexions d'un transistor : base (B); collecteur (C); émetteur (E).

11.1 présentation

Le transistor est un composant électronique à «trois pattes». Il a été rendu célèbre dans le grand public par son utilisation dans les postes récepteurs radio, surnommés depuis «transistors».

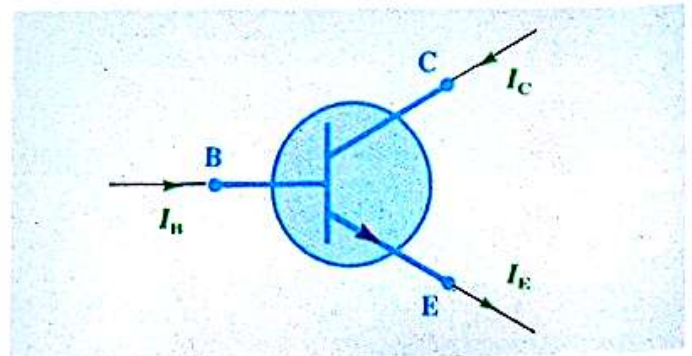
Les trois connexions (fig. 2) sont reliées respectivement aux trois parties du transistor, à savoir :

- la base B,
- le collecteur C,
- l'émetteur E.

Un mode de repérage (ergot ou point de couleur), indiqué par le constructeur, permet de situer chaque connexion, ou borne.

Il existe plusieurs types de transistors dont les fonctions peuvent être tout à fait différentes. Nous étudierons un transistor «NPN» qui se schématise comme sur la figure 3.

Dans ce type de transistor, le courant entre par les bornes B (base) et C (collecteur) et sort par la borne E (émetteur). La loi des nœuds impose : $I_E = I_C + I_B$.

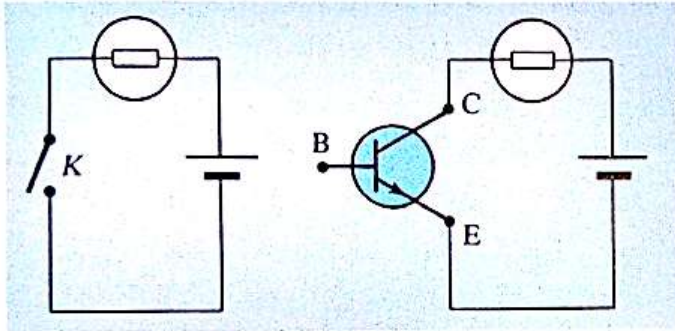


3. Représentation schématique d'un transistor NPN. I_B , I_C et I_E représentent respectivement les courants base, collecteur et émetteur, et l'on a :

$$I_E = I_C + I_B$$

11.2 étude sommaire du fonctionnement

Réalisons le montage de gauche de la figure 4 : interrupteur K ouvert, la lampe est éteinte; K fermé, la lampe brille. Remplaçons l'interrupteur K par le transistor branché aux bornes C et E, de telle manière que le courant éventuel entre par le collecteur C et sorte par l'émetteur E. La lampe ne brille pas. Une mesure d'intensité montre qu'il n'y a pas de courant; le transistor, branché aux bornes C et E, se comporte alors comme un interrupteur ouvert : le transistor est bloqué.



4. Lorsque la base est en connexion ouverte, le transistor est « bloqué »; il se comporte comme un interrupteur ouvert.

Branchons une pile (1,5 V) associée à un rhéostat, de telle sorte qu'un courant entre par la base B du transistor (fig. 5). La lampe brille : le transistor est débloqué (on dit encore passant).

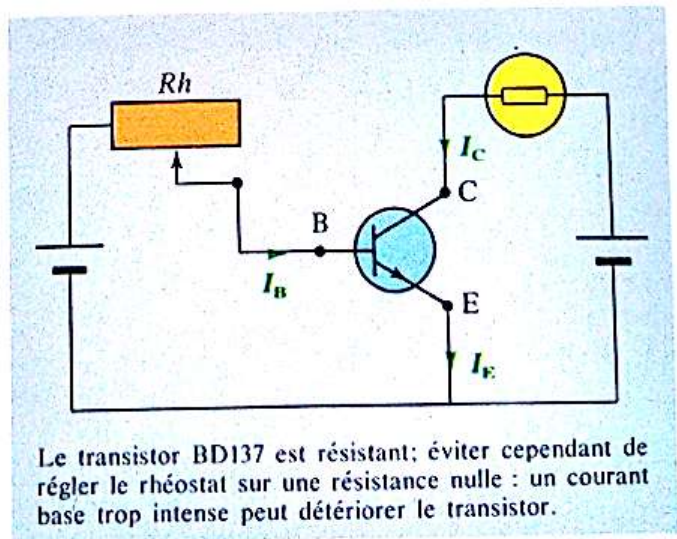
Modifions l'intensité I_B du courant base à l'aide du rhéostat : nous pouvons alors modifier l'éclat de la lampe, c'est-à-dire l'intensité I_C du courant collecteur. Avec un courant base assez fort, la lampe brille intensément : le transistor est parfaitement débloqué.

- Un courant entrant dans la base B permet de débloquer le transistor qui laisse alors passer le courant du collecteur C vers l'émetteur E. Selon l'intensité du courant base, le transistor est partiellement ou complètement débloqué.

Le courant base, fourni par le circuit de commande, permet de commander le passage du courant dans le circuit principal branché aux bornes C et E.

11.3 étude plus approfondie

Pour qu'un courant base traverse le transistor de B vers E, il faut maintenir une tension U_{BE} positive comme nous l'avons fait dans le montage de la figure 5 et dans celui de la fiche expérimentale (ce dernier montage a l'avantage de n'utiliser qu'un seul générateur). Pour préciser le fonctionnement du transistor, mesurons la tension U_{BE} , l'intensité I_B du courant base qui en résulte et l'intensité I_C du courant collecteur qui passe grâce au courant base.



Le transistor BD137 est résistant; éviter cependant de régler le rhéostat sur une résistance nulle : un courant base trop intense peut détériorer le transistor.

5. La base du transistor est alimentée; la lampe brille : le transistor est « débloqué ».

L'ensemble de ces mesures (voir fiche expérimentale) nous permet de constater que :

- Tant que la tension u_{BE} est inférieure à 0,6 V, il n'y a pas de courant base ($I_B = 0$) et aucun courant collecteur ($I_C = 0$) : le transistor est bloqué. Entre C et E, le transistor se comporte comme un interrupteur ouvert.
- Dès qu'un courant base (I_B) apparaît, un courant collecteur nettement plus intense circule dans la lampe : le transistor est débloqué.

Ce phénomène porte le nom d'effet transistor.

On distingue alors deux régimes de fonctionnement :

1. L'intensité I_C du courant collecteur est proportionnelle à l'intensité I_B du courant base :

$$I_C = \beta \cdot I_B.$$

β est appelé gain du transistor ($\beta = 150$ dans l'expérience). Ce régime de fonctionnement est dit régime linéaire. On peut alors régler l'« ouverture » du transistor.

2. L'intensité I_C du courant collecteur atteint sa valeur maximale (pratiquement la même que si l'on court-circuite les bornes C et E du transistor). L'augmentation de l'intensité I_B du courant base n'a plus d'influence : le transistor est dit saturé. Dans cet état, le transistor est complètement débloqué, et se comporte comme un interrupteur fermé.

Le comportement du dipôle (C, E) est commandé par le courant base du transistor. Un transistor peut fonctionner :

- en « tout ou rien », par passage de la situation « transistor bloqué » au régime « transistor saturé ». Il se comporte alors comme un interrupteur commandé électriquement;
- en régime linéaire, où une augmentation du courant base I_B provoque une augmentation β fois plus grande du courant collecteur I_C . Le transistor permet alors d'amplifier une variation de l'intensité du courant base : il joue le rôle d'amplificateur de courant.

11.4 quelques applications

11.4.1 dispositif de protection contre le vol

L'alimentation est une batterie d'accumulateurs 12 V, l'appareil d'utilisation : une sirène (12 V; 1 A), le dispositif de commande : une photorésistance (fig. 6).

Lorsque la photorésistance est dans l'obscurité, la sirène ne fonctionne pas. Approchons une source de lumière (lampe de poche allumée) de la photorésistance : la sirène se met à hurler. Nous pouvons moduler l'intensité du son qu'elle émet en approchant ou en éloignant la source de lumière de la photorésistance. Le fonctionnement de la sirène est donc commandé par la lumière.

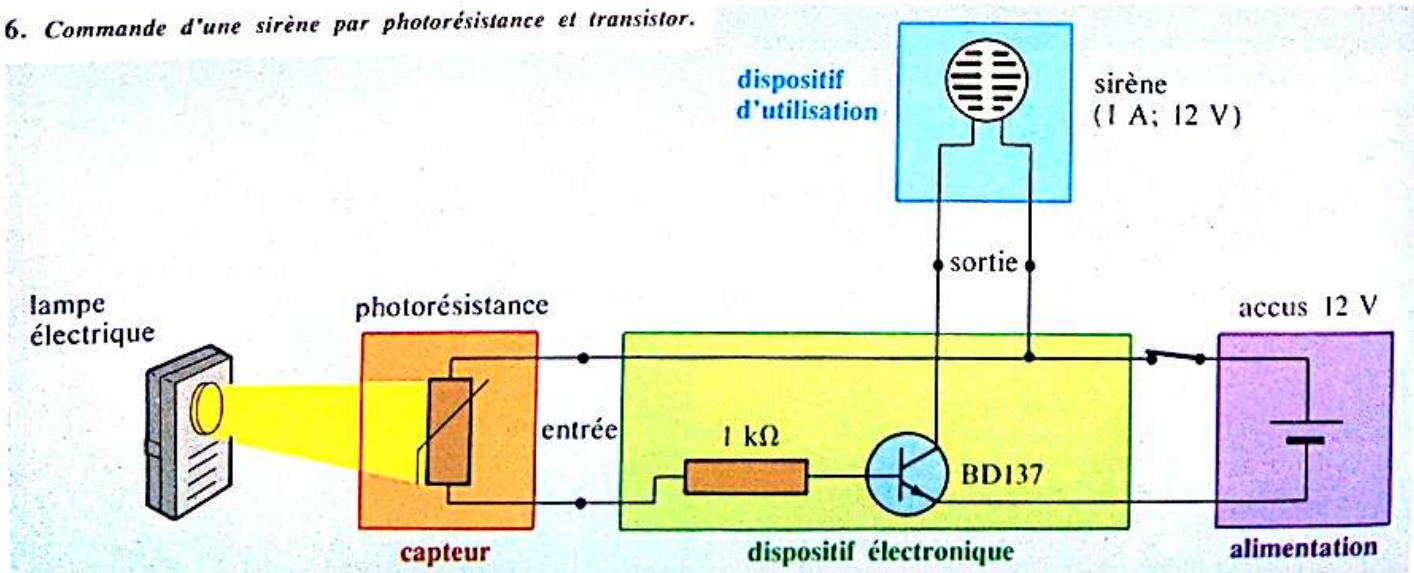
Nous savons que la photorésistance, capteur qui joue le rôle de dispositif de commande, a une résistance qui diminue lorsque l'éclairement reçu augmente.

- Dans l'obscurité, sa résistance est très grande (quelques mégohms) : le courant base qui la traverse a alors une intensité beaucoup trop faible pour débloquer le transistor; la sirène ne fonctionne pas.

- Lorsque nous approchons une source de lumière, la résistance de la photorésistance diminue (elle ne vaut plus qu'une centaine d'ohms en pleine lumière) : le courant base augmente; le transistor est débloqué, et le courant collecteur atteint alors une intensité suffisante pour faire tourner le moteur de la sirène.

Ce dispositif peut être utilisé comme système d'alarme. A l'ouverture de la porte protégée, la lumière que reçoit la photorésistance débloquent le transistor et la sirène se met à hurler.

6. Commande d'une sirène par photorésistance et transistor.



Fiche expérimentale

fonctionnement du transistor

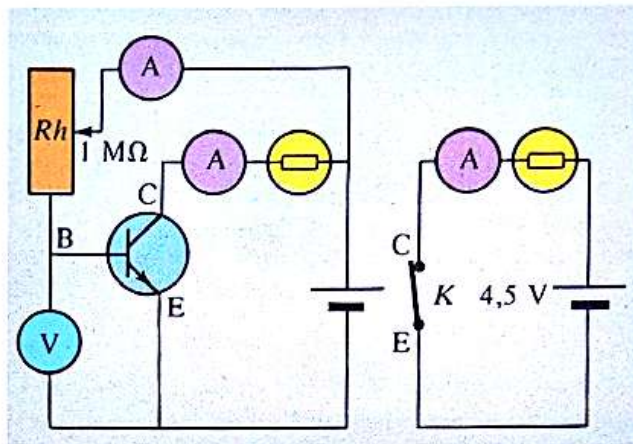
Première expérience

Lorsqu'on ferme l'interrupteur K, la lampe (3,5 V; 0,2 A) se met à briller; le courant qui circule est de 0,21 A.

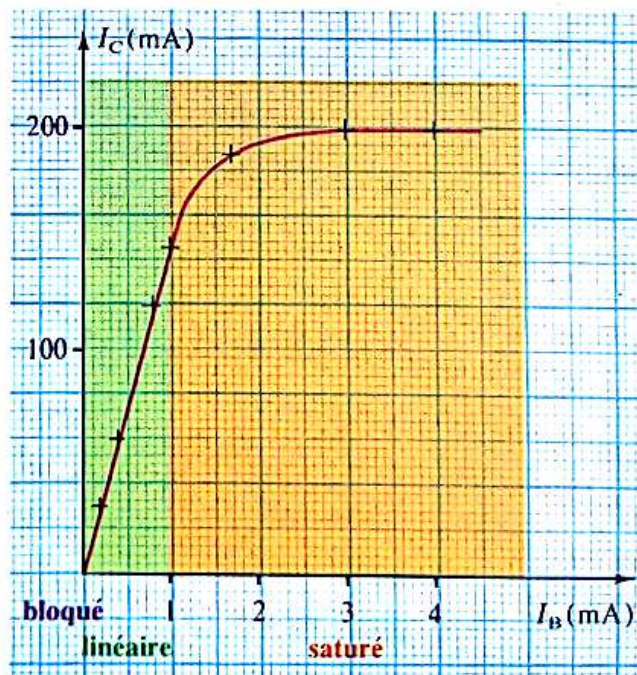
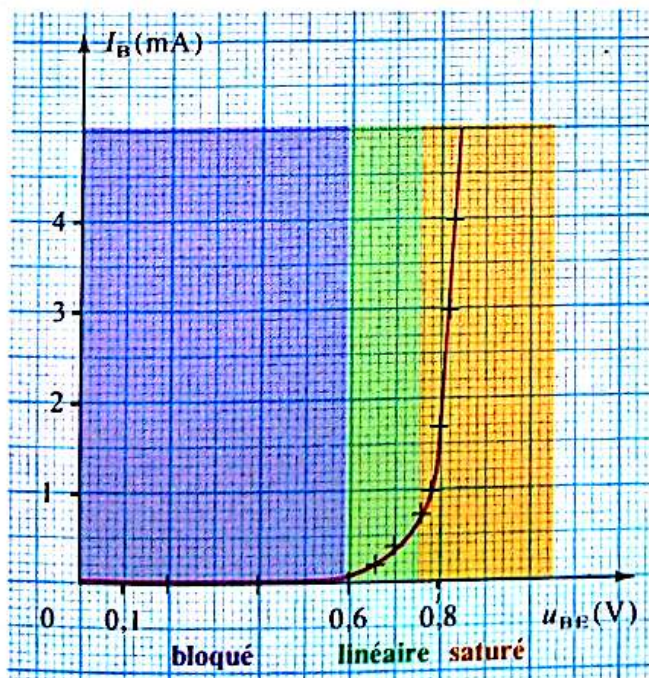
Seconde expérience

Remplaçons l'interrupteur par un transistor NPN; l'émetteur E et le collecteur C sont branchés dans le circuit précédent à la place de l'interrupteur. Puis relierons la base B à la borne + de la pile par l'intermédiaire d'un rhéostat de 1 MΩ.

Pour différentes positions du curseur du rhéostat, nous relevons u_{BE} , I_B et I_C et traçons les courbes représentatives de $I_B = f(u_{BE})$ et $I_C = g(I_B)$.



u_{BE} (V)	0	0,2	0,4	0,6	0,65	0,7	0,75	0,77	0,79	0,81	0,82	
I_B (mA)	0	0	0	0	0,2	0,4	0,8	1,0	1,7	3	4	
I_C (mA)	0	0	0	0	30	60	120	150	197	200	200	
régime de fonct ^{nt}	phase 1 transistor bloqué $I_B = 0, I_C = 0$				phase 2 régime linéaire $I_C = 150 \cdot I_B$				phase 3 transistor saturé $\forall I_B, I_C = 200$ mA			



11.4.2 indicateur de niveau d'eau

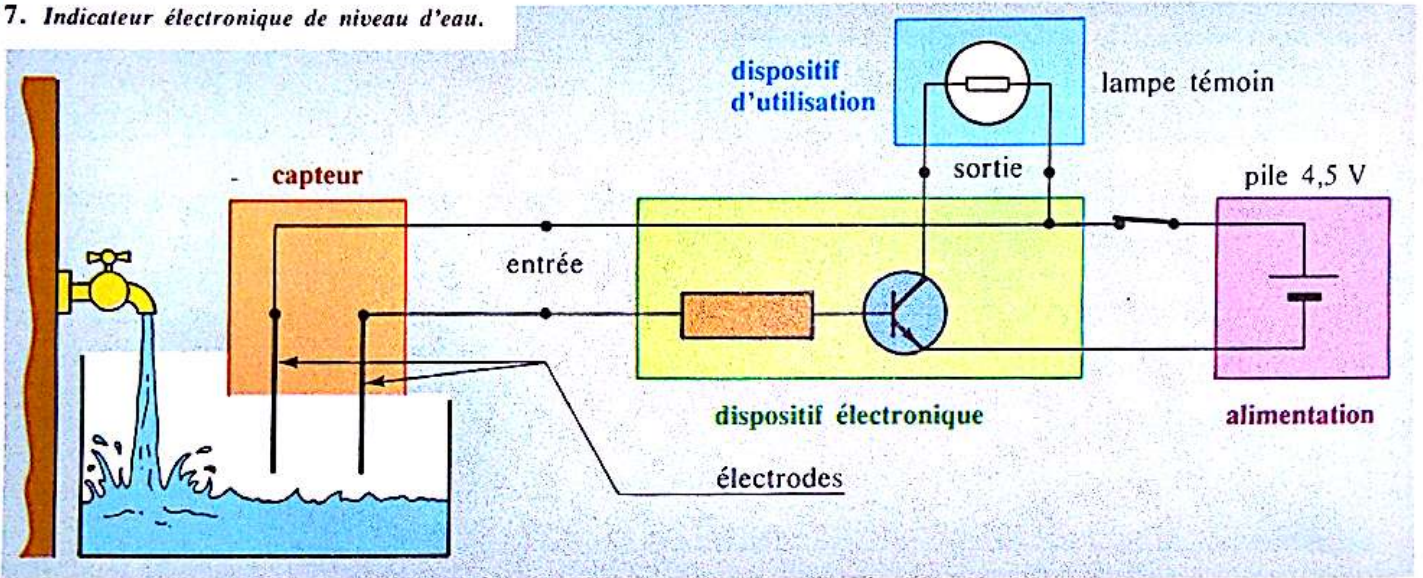
L'alimentation peut être constituée par une pile de 4,5 V, le dispositif d'utilisation par une lampe. Lorsque l'eau atteint les électrodes, le voyant lumineux s'allume (fig. 7).

La lampe peut être remplacée par le moteur d'une pompe (il convient d'adapter alors l'alimentation) qui se met en marche lorsque l'eau atteint le niveau voulu.

Remarque : Ce montage nous montre qu'un même dispositif électronique peut éventuellement être employé avec des appareils d'utilisation et des dispositifs de commande différents. Il convient cependant :

- que l'alimentation soit adaptée au fonctionnement de l'appareil d'utilisation; sa tension à vide ne doit pas dépasser la tension maximale U_{CE} que peut supporter le transistor (ici 60 V);
- que l'appareil d'utilisation ne demande pas un courant d'intensité supérieure à l'intensité maximale que peut supporter le transistor (ici 1,5 A). Il nous faut donc éviter de mettre la sortie en court-circuit.

7. Indicateur électronique de niveau d'eau.



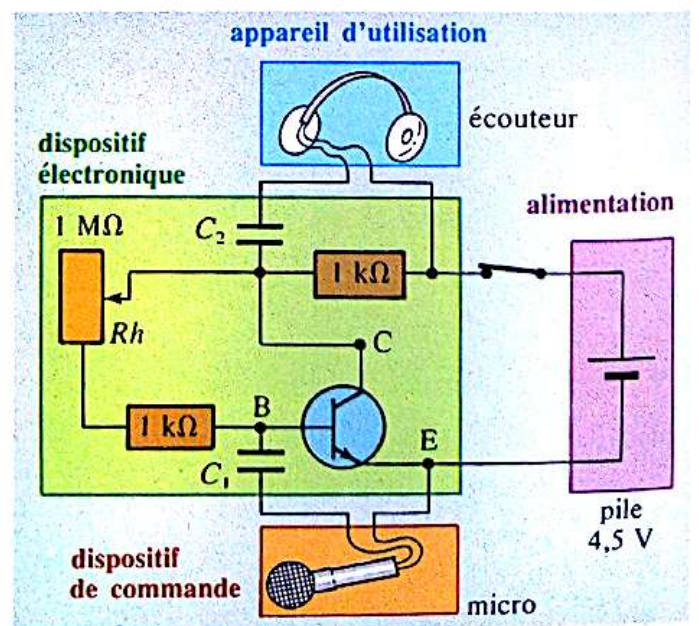
11.4.3 microphone et écouteur

Réalisons le montage de la figure 8. A l'entrée du dispositif électronique, nous avons branché un microphone, à la sortie, un écouteur (téléphonique, par exemple). Lorsque nous parlons près du microphone, l'écouteur reproduit les sons pour un réglage convenable du rhéostat R_h .

Le microphone est un capteur sensible aux sons. Branchons-le à un oscillographe (fig. 9a); il se comporte comme un dipôle actif aux bornes duquel apparaît une tension variable lorsque nous parlons à proximité.

Un écouteur, comme un haut-parleur, est un appareil qui permet de reproduire les sons. Branchons l'écouteur à un générateur de courant alternatif (fig. 9b) : le courant d'intensité variable qui traverse l'écouteur provoque l'émission d'un son.

Si nous branchons l'écouteur directement aux bornes du microphone (fig. 9c), nous n'obtenons pas la reproduction des sons : le courant issu du capteur a une intensité trop faible pour faire fonctionner l'écouteur.



8. Amplificateur avec microphone et écouteur.

Le dispositif électronique nous a donc permis d'amplifier le courant variable issu du microphone. Le courant variable, amplifié, fait fonctionner l'écouteur branché à la sortie du dispositif électronique, appelé *amplificateur*. Le rhéostat R_h permet de régler l'intensité du courant base de telle sorte que le transistor ne soit ni bloqué, ni saturé et puisse jouer son rôle d'amplificateur.

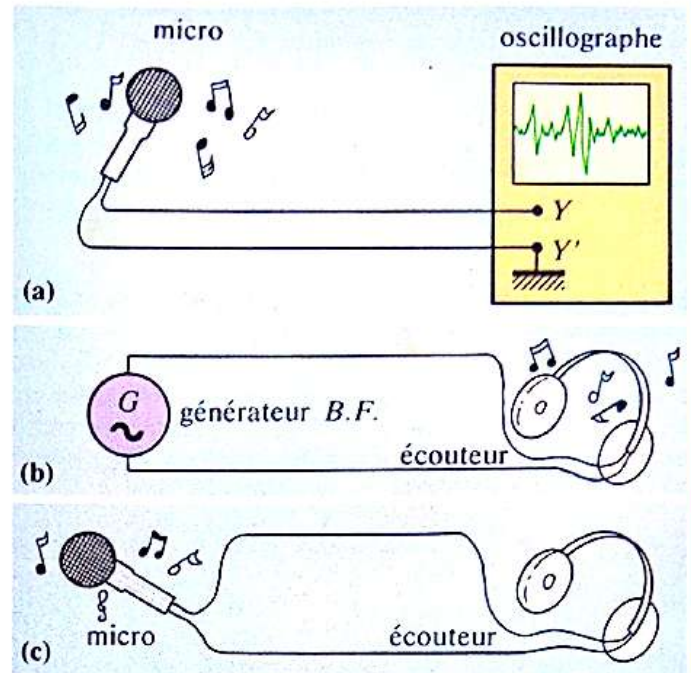
Lorsqu'il reçoit des sons, le microphone provoque des variations très rapides et de faibles amplitudes de l'intensité du courant base : ΔI_B .

A ces variations, correspondent les variations amplifiées ΔI_C de l'intensité du courant collecteur qui traverse l'écouteur telles que :

$$\Delta I_C = \beta \cdot \Delta I_B.$$

Dans le montage de la figure 8, nous avons utilisé deux condensateurs C_1 et C_2 . Usuellement, un condensateur a la particularité d'empêcher le passage dans un circuit d'un courant continu, et de laisser circuler les courants alternatifs.

Par exemple, dans le montage de la figure 8, le condensateur C_1 empêche la fuite du courant base à travers le microphone, mais laisse passer le courant variable issu du capteur.



9. Un micro transforme le son en variations de tension et d'intensité d'un courant qu'il engendre. Un écouteur assure la transformation inverse.

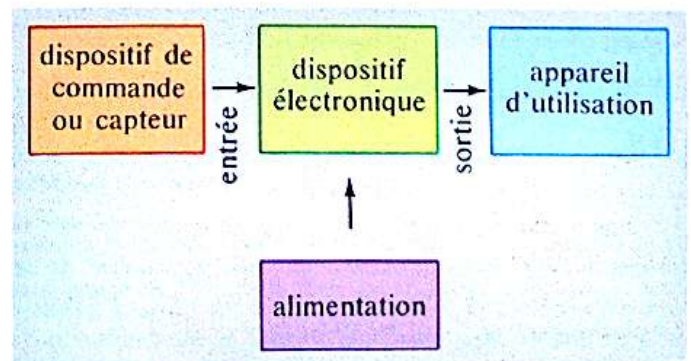
11.5 notion de chaîne électronique

Si nous observons les différents montages de ce chapitre ou du précédent, nous retrouvons toujours la même disposition; nous avons réalisé différentes *chaînes électroniques* qui comportent :

- à l'entrée : un dispositif de commande (capteur);
- un dispositif électronique (un transistor) alimenté par un générateur;
- à la sortie : un appareil d'utilisation (encore appelé « transducteur »).

En général les dispositifs de commandes sont fragiles et ne peuvent supporter que des intensités ou des tensions faibles. Ils transforment tout signal (mécanique, optique, électrique) en un signal électrique. Le dispositif pourra être éventuellement situé à grande distance de la chaîne car les fils de connexion ne seront parcourus que par un courant de faible intensité.

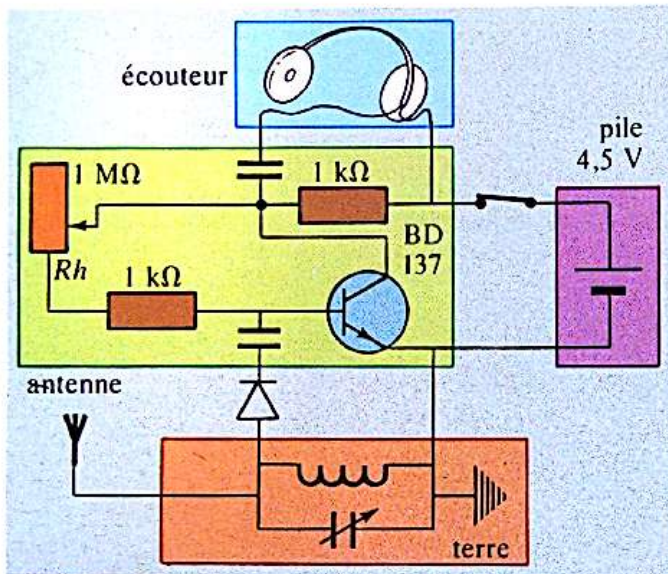
Les appareils d'utilisation sont des dispositifs qui transforment un signal électrique en un autre signal de nature diverse : mécanique, optique, sonore, électrique... Pour les faire fonctionner, il est souvent nécessaire de disposer d'une puissance convenable. Cette puissance électrique sera fournie par l'alimentation de la chaîne électronique.



10. Organigramme d'une chaîne électronique.

Récepteur radiophonique

Branchons à l'entrée de l'amplificateur du paragraphe 11.4.3 le dispositif de la figure 11. Ce dispositif(*) est constitué par une bobine de fil de cuivre émaillé et un condensateur réglable associés en parallèle, reliés d'une part à la terre (éventuellement à une canalisation métallique d'eau ou de gaz), d'autre part à une antenne constituée par un fil conducteur de plusieurs mètres de longueur et à une diode.



11. Un poste récepteur radio élémentaire.



Circuit d'un petit récepteur radio.

(*) La bobine (ou *self*) doit comporter environ 240 spires jointives sur cylindre ferromagnétique de \varnothing 10 mm et de longueur 10 cm pour capter les grandes ondes (GO) et de 60 à 80 spires pour les petites ondes (PO). Le condensateur a une capacité d'environ 400 picofarads.

En agissant sur le rhéostat Rh pour obtenir un bon fonctionnement de l'amplificateur (transistor ni bloqué, ni saturé) et sur le réglage du condensateur variable, l'écouteur nous transmet une émission radio. Nous avons réalisé un poste récepteur radio comprenant :

- un capteur d'ondes radio :
 - l'antenne reçoit les ondes,
 - la diode n'en garde que la partie significative (elle *démodule* les ondes),
 - la bobine et le condensateur permettent de les sélectionner, d'*accorder* le capteur au poste émetteur; en agissant sur le condensateur variable, il est éventuellement possible de changer de station émettrice;
- un dispositif électronique amplificateur;
- une alimentation;
- un appareil d'utilisation : l'écouteur.

Si nous branchons le capteur à un oscillographe, nous pouvons mettre en évidence une tension variable entre ses bornes, tension dont nous pouvons modifier l'amplitude en agissant sur le réglage du condensateur.

Branchons directement le capteur à l'écouteur: nous n'entendons que très faiblement l'émission radio. Les petites variations d'intensité et de tension (ΔI_B , ΔU_{BE}) dues au capteur branché à l'entrée du dispositif électronique sont donc amplifiées et transmises à l'écouteur branché à la sortie.

Il est évident que le poste récepteur radio que nous venons de fabriquer n'est qu'une très médiocre réalisation. Nous trouvons, à bas prix dans le commerce, des récepteurs de bien meilleure qualité.

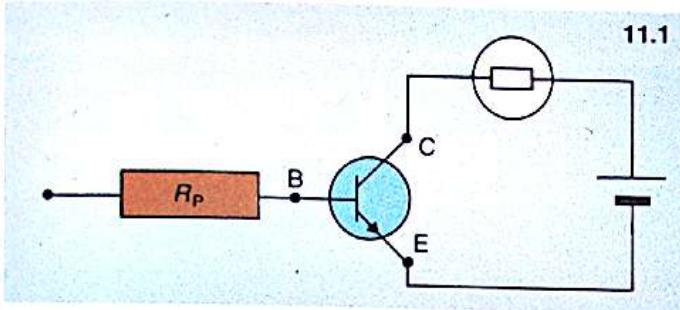
Cela est dû à l'extrême simplicité de notre dispositif électronique (un seul transistor) qui n'amplifie que très faiblement. Un bon amplificateur est un dispositif extrêmement complexe, mais, comme le nôtre, qui est rudimentaire, il possède une entrée destinée au branchement du capteur (micro, capteur d'émissions radio, ou *tuner*, cellule de lecture d'un tourne-disque) et une sortie pour brancher le (ou les) haut-parleur(s). Il est généralement alimenté par le secteur; le courant alternatif est alors redressé et transformé en courant continu à l'intérieur même de l'appareil. Les petites variations de tension et d'intensité appliquées à l'entrée de l'amplificateur sont suffisamment amplifiées pour permettre au(x) haut-parleur(s) de diffuser des sons avec une forte intensité et une bonne fidélité.

Étude qualitative

11.1 On a réalisé le montage ci-après, qui comporte un transistor NPN. On dispose d'une autre pile et de fils de jonction.

1/ Compléter le montage dans le but de débloquer le transistor.

2/ Nommer et indiquer le sens des différents courants. Quel est le rôle du conducteur ohmique R_P ?



11.2 Reprendre le montage de l'exercice précédent. On ne dispose seulement cette fois que d'un fil de jonction.

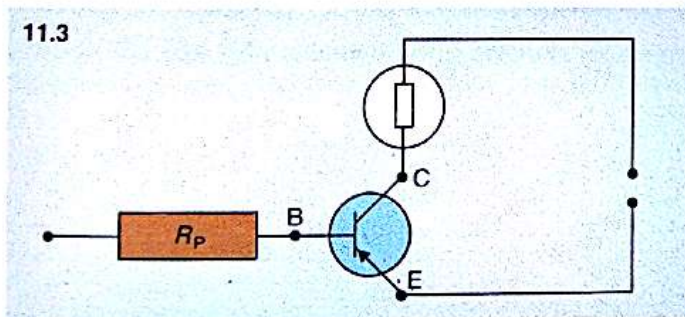
1/ Indiquer comment on peut débloquer le transistor.

2/ Qu'arrive-t-il au transistor si le courant base est trop intense?

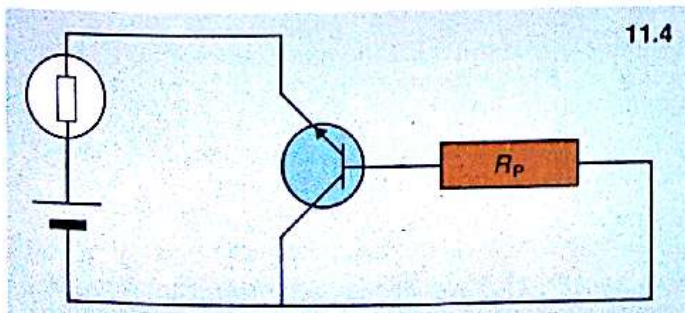
11.3 Le montage inachevé ci-après comporte un transistor PNP.

1/ Indiquer comment on branche le générateur alimentant le circuit principal.

2/ Indiquer comment on peut débloquer le transistor :
a/ avec une pile et des fils de jonction;
b/ avec seulement un fil de jonction.



11.4 Dans le montage ci-après, les branchements sont-ils corrects? Justifier la réponse en nommant les bornes et en précisant le sens des courants éventuels. Quelle modification peut-on proposer?

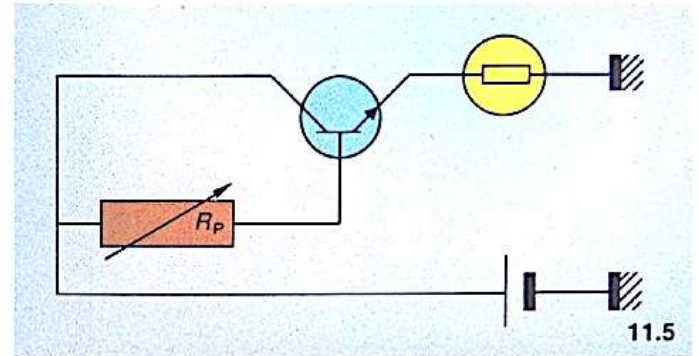


11.5 Le montage ci-après comporte un transistor NPN.

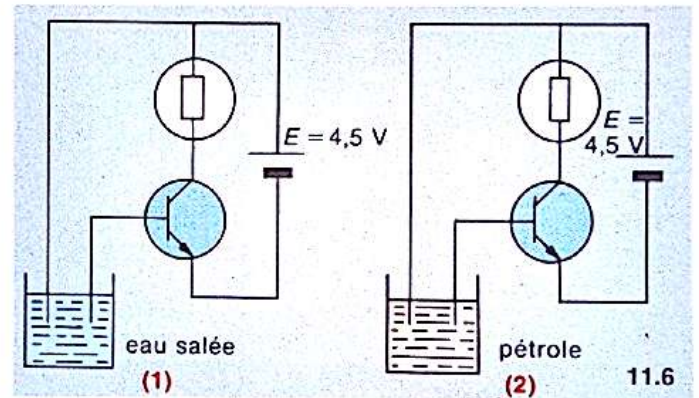
1/ Indiquer la base, l'émetteur et le collecteur.

2/ Est-il possible que le transistor soit débloqué et que la lampe brille? Indiquer le sens des différents courants.

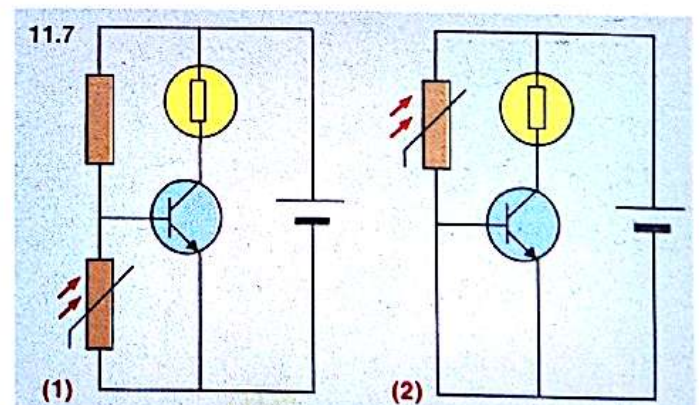
3/ Que se passe-t-il quand on modifie la résistance R_P ?



11.6 Dans lequel des deux cas ci-après la lampe s'allume-t-elle?



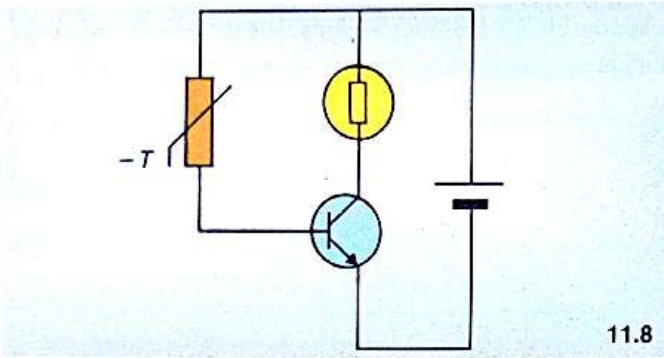
11.7 Dans lequel des deux cas ci-après la lampe peut-elle s'éteindre lorsque la photorésistance est éclairée?



11.8 Placer dans l'ordre les affirmations suivantes relatives au montage ci-après :

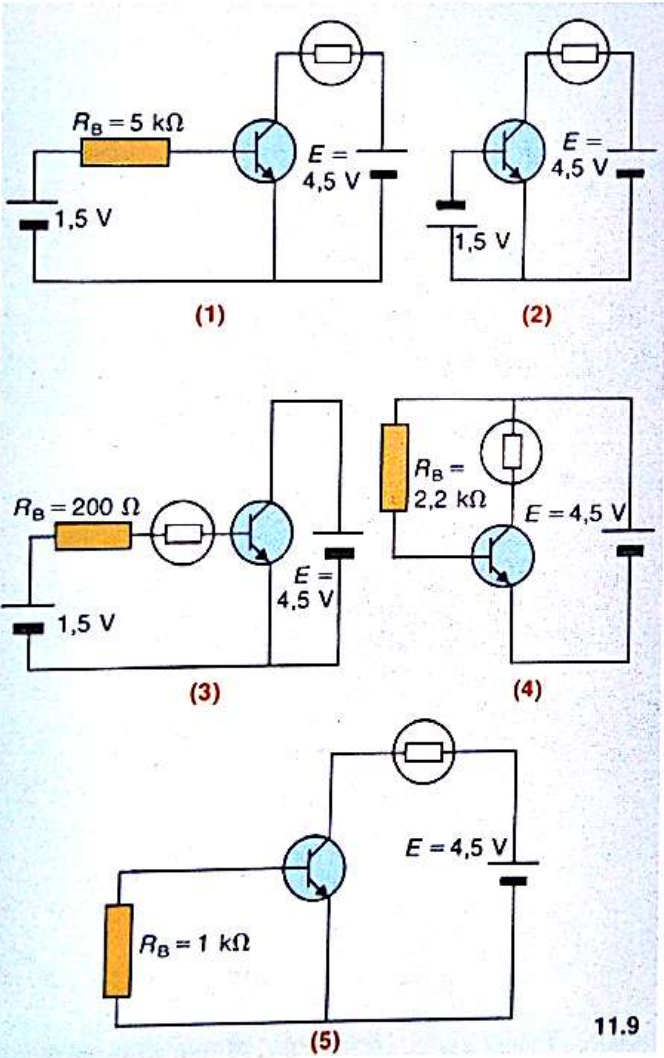
- diminution de la résistance de la thermistance;
- le transistor est débloqué; le courant base du transistor provoque un courant dans le collecteur.
- chauffage de la thermistance par une allumette;
- un courant suffisant traverse alors l'ampoule placée dans le circuit collecteur;

e/ la thermistance sert à polariser la base d'un transistor qui comporte une ampoule dans son circuit collecteur;
 // l'ampoule brille.



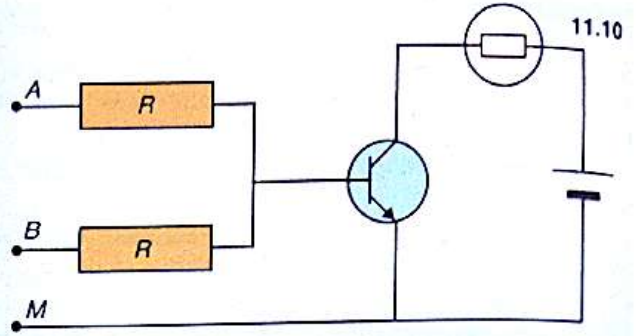
11.8

11.9 Indiquer parmi les montages ci-après ceux pour lesquels la lampe (3,5 V; 0,3 A) brille.



11.9

11.10 On considère le montage ci-après, où, entre les points A et M et B et M, on peut appliquer des tensions nulles ou de 1 V. Compléter la table de vérité; on attribuera à la lampe la valeur 0 si elle ne brille pas et la valeur 1 dans le cas contraire.



11.10

U_{AM}	U_{BM}	lampe
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

Pour débloquer le transistor, il faut une tension base-émetteur de 0,7 V.

Exercices quantitatifs

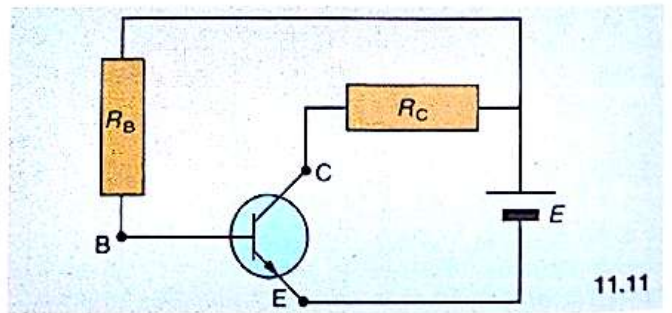
11.11 Vérifier que le montage proposé ci-dessous est correct: pour cela, préciser le sens des différents courants éventuels.

1/ Le générateur a une f.é.m. $E = 6$ V, une résistance interne négligeable. Si $R_C = 200 \Omega$, quelle est l'intensité maximale du courant collecteur I_C ?

2/ Le gain du transistor est $\beta = 120$. Que vaut I_C si

$I_B = 0,1$ mA, $I_B = 0,2$ mA, $I_B = 0,50$ μ A?

3/ Pour quelles valeurs de I_B le transistor est-il saturé?



11.11

11.12 On considère à nouveau le montage de l'exercice précédent. Le générateur est cette fois une pile de f.é.m. $E = 4,5$ V, de résistance interne $r = 1,5 \Omega$ et $R_C = 27 \Omega$.

1/ Quelle est l'intensité du courant lorsque le transistor est complètement débloqué (saturation)?

2/ Le gain du transistor est $\beta = 120$. Quelle est l'intensité I_B du courant base à la limite de saturation du transistor?

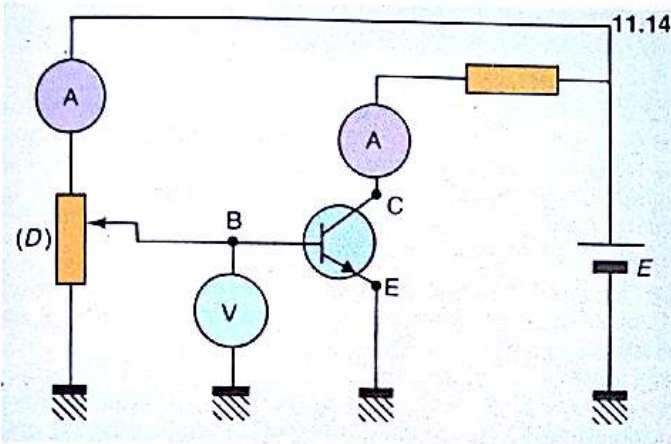
3/ Que se passe-t-il si on court-circuite la base et l'émetteur?

11.13 On considère à nouveau le montage de l'exercice 11.11, avec $E = 6\text{ V}$, $r = 0$ et $R_C = 200\ \Omega$.

1/ Pour débloquer le transistor, il faut une tension u_{BE} d'environ $0,7\text{ V}$. Si $R_B = 30\text{ k}\Omega$, quelle est alors l'intensité I_B du courant base?

2/ Pour $\beta = 120$, donner les valeurs de I_E , I_C et u_{CE} ?

11.14 Pour étudier le fonctionnement d'un transistor, on réalise le montage ci-dessous. Le générateur a une résistance interne négligeable et maintient une tension constante entre ses bornes.



1/ Que mesurent les micro-ampèremètres et le voltmètre? A quoi sert le dispositif (D)?

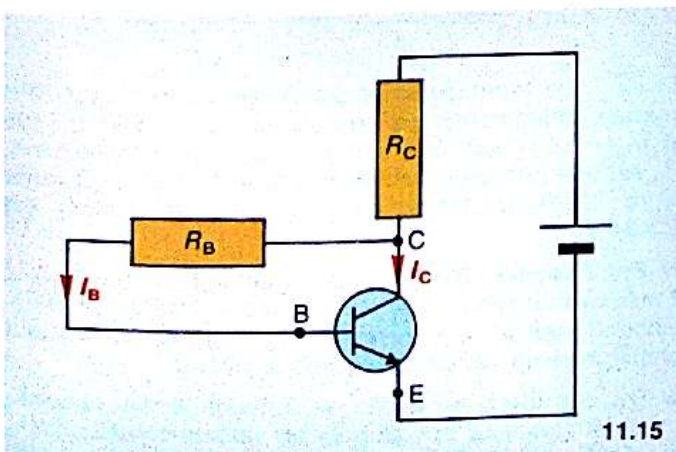
2/ On obtient les mesures suivantes :

u_{BE} (V)	0,3	0,5	0,6	0,65	0,69	0,70	0,71	0,72
I_B (mA)	0	0	0,01	0,05	0,2	0,5	1	1,5
I_C (mA)	0	0	1,5	7,6	33	72	149	151

Montrer que l'on peut distinguer trois régimes différents de fonctionnement du transistor.

3/ Représenter graphiquement I_C en fonction de I_B . Que vaut le gain β de ce transistor?

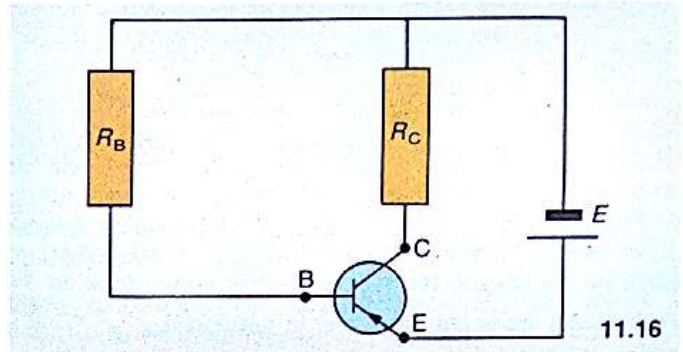
11.15 Dans le montage ci-après, le générateur maintient entre ses bornes une tension constante de 9 V . La tension u_{BE} entre base et émetteur du transistor débloqué reste pratiquement égale à $0,6\text{ V}$. Lorsque $I_B = 20\ \mu\text{A}$, $u_{CE} = 4\text{ V}$. Calculer R_B et R_C sachant que le gain du transistor est $\beta = 200$.



11.16 On considère le montage ci-dessous qui comporte un transistor PNP de gain $\beta = 100$, un générateur de f.é.m. $E = 6\text{ V}$ et de résistance négligeable.

1/ Indiquer le sens des différents courants.

2/ Calculer R_B et R_C lorsque $I_B = 30\ \mu\text{A}$, $u_{EC} = 2\text{ V}$ et $u_{EB} = 0,7\text{ V}$.



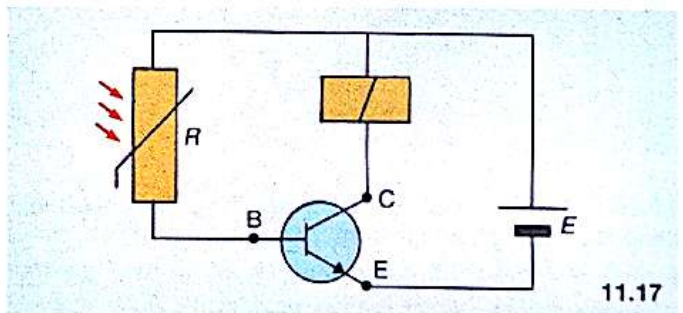
11.17 Un transistor NPN, de gain $\beta = 150$, est utilisé pour réaliser un dispositif de commande d'un relais par une photorésistance de résistance R (variable). Nous supposons, pour simplifier, que $u_{BE} = 0,7\text{ V}$. Le générateur a une f.é.m. $E = 12\text{ V}$ et une résistance interne négligeable.

1/ Que vaut I_B lorsque $R = 1\text{ M}\Omega$ (obscurité)? Lorsque $R = 1000\ \Omega$ (lumière)?

2/ Que vaudrait théoriquement I_C dans l'un et l'autre cas?

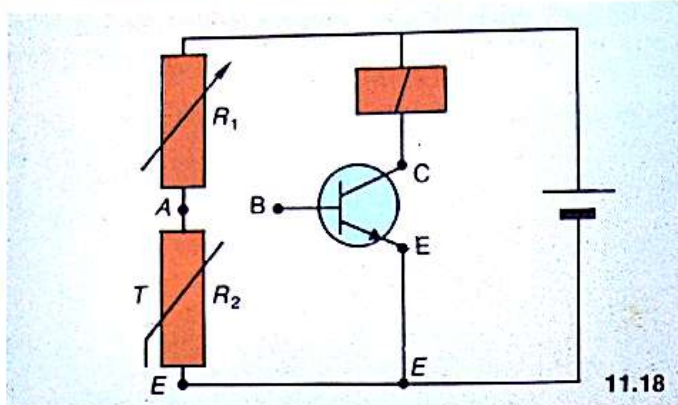
3/ Le relais s'enclenche à partir d'un courant d'intensité 6 mA et se désenclenche lorsque l'intensité du courant devient inférieure à 5 mA . Le dispositif réalisé peut-il fonctionner, c'est-à-dire enclencher le relais en pleine lumière et le désenclencher dans l'obscurité?

4/ La résistance du relais est $300\ \Omega$. Pour quelle valeur de R le transistor est-il saturé?



Exercices plus difficiles

11.18 On considère le montage ci-après, dans lequel le générateur a une f.é.m. de 12 V et une résistance interne négligeable. Pour débloquer le transistor, une tension u_{BE} d'au moins $0,7\text{ V}$ est nécessaire. La résistance R_2 de la thermistance varie de $600\ \Omega$ à $20\ ^\circ\text{C}$ à $100\ \Omega$ à $100\ ^\circ\text{C}$.



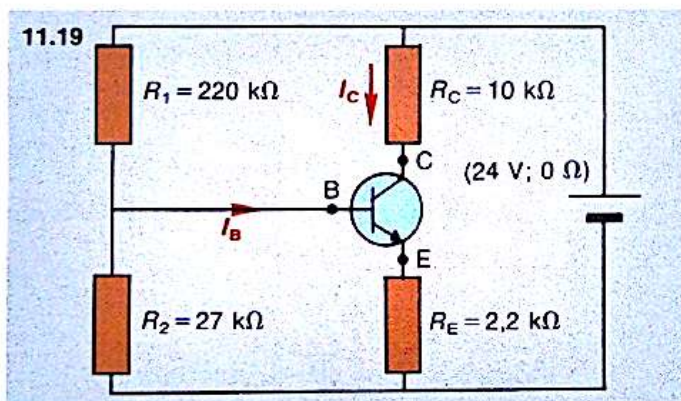
11.18

1/ On ajuste R_1 à la valeur 8000Ω . Calculer l'intensité du courant à travers R_1 et R_2 , lorsque la thermistance est à 20°C , puis à 100°C .

2/ Calculer dans les deux cas la tension u_{AE} .

3/ Que se passe-t-il si l'on relie les bornes A et B? On admettra que ce branchement ne modifie pratiquement pas les intensités et tensions précédemment calculées. Pour quelle température le relais est-il enclenché? désenclenché? Imaginer un dispositif pratique utilisant ce montage.

11.19 On considère le montage ci-après, où $u_{BE} = 0,1\text{ V}$ et $\beta = 100$. Calculer I_B , I_C et u_{CE} . On fera les approximations nécessaires.



11.19

11.20 On considère un transistor qui peut fonctionner dans les deux états suivants lorsque $u_{BE} = 0,6\text{ V}$:

- régime linéaire : $I_B \leq 1\text{ mA}$, et $I_C = \beta \cdot I_B$ avec $\beta = 100$;
- régime saturé : $I_B > 1\text{ mA}$, et $u_{CE} = 0$.

Le transistor est utilisé dans le montage ci-après. R_1 est un conducteur ohmique de résistance $5\text{ k}\Omega$, R_2 une thermistance. A est un ampèremètre dont la chute de tension aux bornes est négligeable; il est utilisé sur le calibre 100 mA et mesure I_C .

1/ Calculer la valeur de la résistance R pour que l'intensité de saturation soit égale à 100 mA . On suppose cette condition réalisée dans la suite du problème.

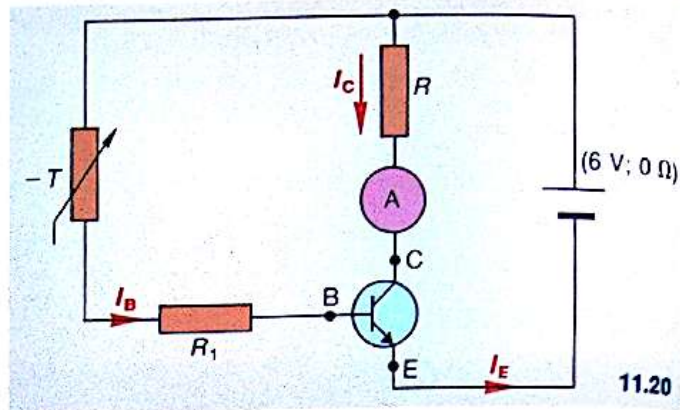
2/ Le transistor est en régime linéaire. Quelle relation existe-t-il entre I_C et R_2 ?

3/ Sur un intervalle de température $[-40^\circ\text{C}, 80^\circ\text{C}]$, R_2 est donnée avec une bonne précision par la formule :

$$R_2(\Omega) = 2000 \cdot (1 - 10^{-2} \cdot \theta)$$

avec θ en $^\circ\text{C}$. Représenter graphiquement la fonction

$$\theta \mapsto I_C = f(\theta)$$



11.20

11.21 Le montage ci-après comporte un transistor NPN de gain β . On admettra, pour simplifier, que lorsque le transistor est débloqué, la tension u_{BE} conserve une valeur constante U_{sat} et ce, quelle que soit l'intensité I_B du courant base. Le générateur est caractérisé par sa f.é.m. E et sa résistance interne r .

1/ Si I_C est l'intensité du courant qui traverse le dispositif d'utilisation, montrer que la résistance R obéit à la relation :

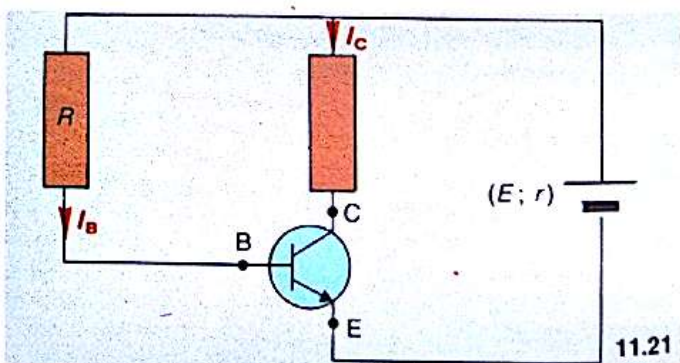
$$E - r \cdot \frac{\beta + 1}{\beta} \cdot I_C = R \cdot \frac{I_C}{\beta} + U_{sat}$$

lorsque le transistor est en régime linéaire.

2/ Si $I_{C\text{ max}} = I_{sat}$ est l'intensité de saturation, qui conserve une valeur constante quelle que soit I_B , montrer que l'on a :

$$E - r \cdot (I_{sat} + I_B) = R \cdot I_B + U_{sat}$$

Ces relations, apparemment compliquées, s'obtiennent simplement en appliquant la loi de fonctionnement du générateur et les lois d'additivité des tensions et des courants. Par ailleurs, la résistance r du générateur est souvent négligeable; écrire les relations simplifiées si on considère $r = 0$.



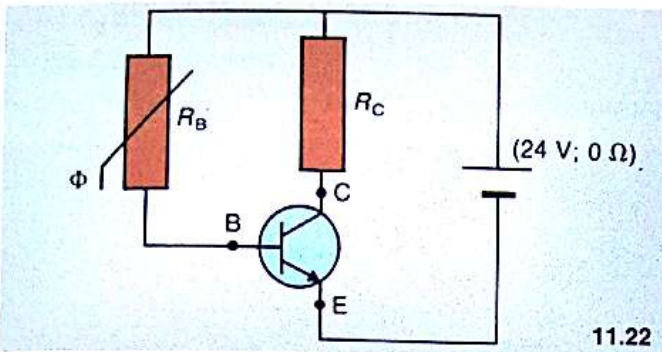
11.21

11.22 Le montage ci-après utilise un transistor NPN comme amplificateur de courant ($I_C = \beta \cdot I_B$ avec $\beta = 100$ et $u_{BE} = 0,4\text{ V}$ quel que soit I_B lors du fonctionnement). R_B est une photorésistance dont la résistance peut varier entre $10^2 \Omega$ et $10^5 \Omega$. La f.é.m. du générateur est $E = 24\text{ V}$.

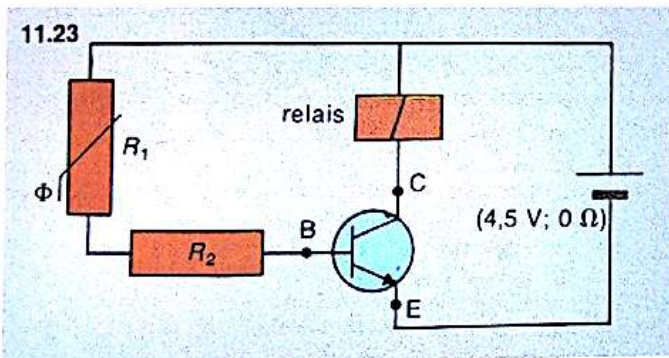
1/ Entre quelles limites peut varier I_B ? On limite I_B à 2 mA au maximum; quel conducteur ohmique de résistance R doit-on ajouter en série à R_B ? Ce conducteur ohmique reste par la suite dans le circuit.

2/ On considère le régime de fonctionnement suivant : $u_{CE} = 14\text{ V}$, $I_B = 0,8\text{ mA}$. Donner les valeurs correspondantes de R_C et de R_B .

3/ Avec la valeur de R_C trouvée précédemment, on fait varier R_B . Pour quelle valeur de I_B a-t-on $u_{CE}=0$? Le transistor est alors saturé. Calculer R_B .



11.23 On réalise le montage ci-après qui comporte un transistor NPN de gain $\beta=100$. On admettra, pour simplifier, que lorsque le transistor est débloqué, la tension u_{BE} conserve une valeur constante $U_{sat}=0,7$ V, et ce, quelle que soit l'intensité I_B du courant base. Le dispositif d'utilisation est un relais, de résistance 300Ω , qui s'enclenche lorsque l'intensité du courant est supérieure à $I_e=10$ mA et se désenclenche lorsque l'intensité est inférieure à $I_d=4$ mA. Le dispositif de commande est une photorésistance dont la résistance R_1 varie de 200Ω en pleine lumière à $10^5 \Omega$ dans l'obscurité complète. Une pile de f. é. m. $E=4,5$ V, de résistance interne négligeable, alimente l'ensemble.



1/ Calculer l'intensité de saturation $I_{Cmax}=I_{sat}$.

2/ Calculer la résistance R_2 du conducteur ohmique de protection, si on veut limiter I_B à 5 mA.

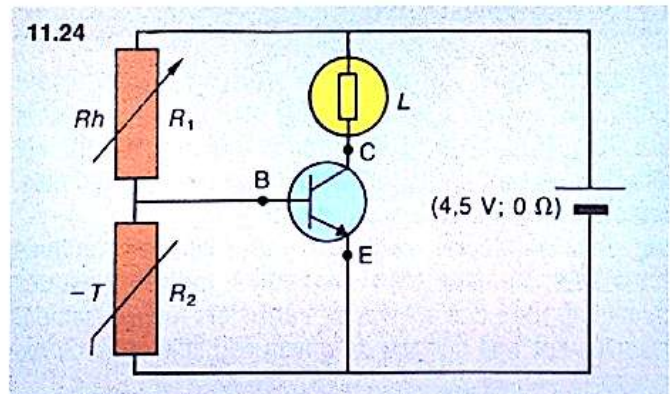
3/ Montrer que le relais s'enclenche lorsqu'on expose la photorésistance en pleine lumière. Pour quelles valeurs de R_1 peut-il s'enclencher, R_2 ayant la valeur calculée précédemment?

4/ Montrer que le relais se désenclenche lorsque la photorésistance est dans l'obscurité.

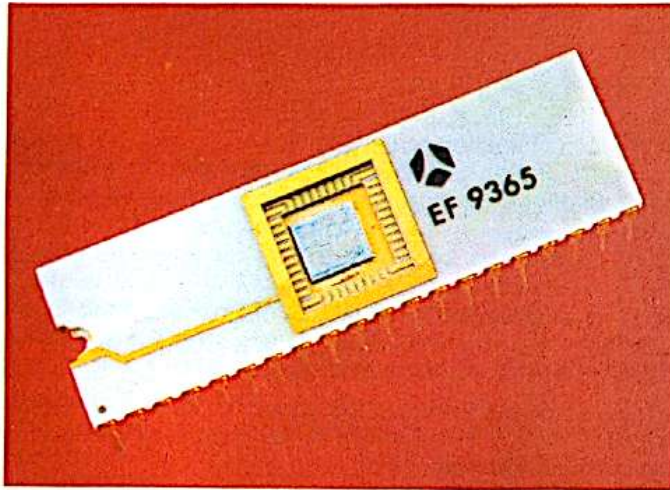
11.24 On veut réaliser un détecteur d'échauffement à l'aide d'une thermistance, d'un transistor et d'une lampe L . On réalise pour cela le montage ci-après qui comporte un transistor NPN de gain $\beta=500$. On admettra, pour simplifier, que lorsque le transistor est débloqué, la tension u_{BE} conserve une valeur constante $U_{sat}=0,6$ V, et ce, quelle que soit l'intensité I_B du courant base. A 20°C , la résistance de la CTN vaut 600Ω ; elle tombe à 140Ω à la température de 60°C . Rh est un rhéostat de résistance R_1 réglable. La lampe nécessite, pour fonctionner, un courant d'intensité $I_C=200$ mA.

1/ La température de la CTN valant 20°C , quelle valeur faut-il donner à la résistance R_1 du rhéostat pour que la lampe brille correctement?

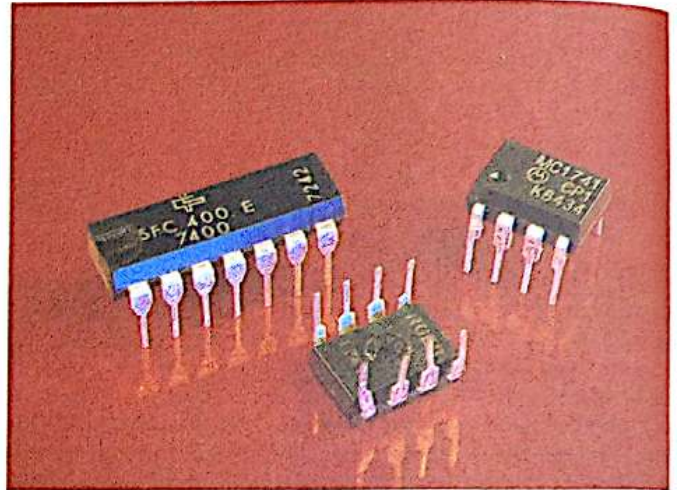
2/ La résistance R_1 du rhéostat conservant la valeur précédemment déterminée, montrer que le transistor est bloqué lorsque la CTN est portée à la température 60°C . Pourquoi peut-on dire que l'on a réalisé un détecteur d'échauffement?



L'amplificateur opérationnel



1. Circuit intégré et son système de connexion.



2. Quelques amplificateurs opérationnels.

12.1 présentation

En électronique, le transistor « discret » (composant formé uniquement d'un transistor) conserve une certaine notoriété. Mais ce sont les *circuits intégrés* qui ont « la vedette », et parmi eux, les amplificateurs opérationnels, surnommés « ampli-op », en abrégé A.O.

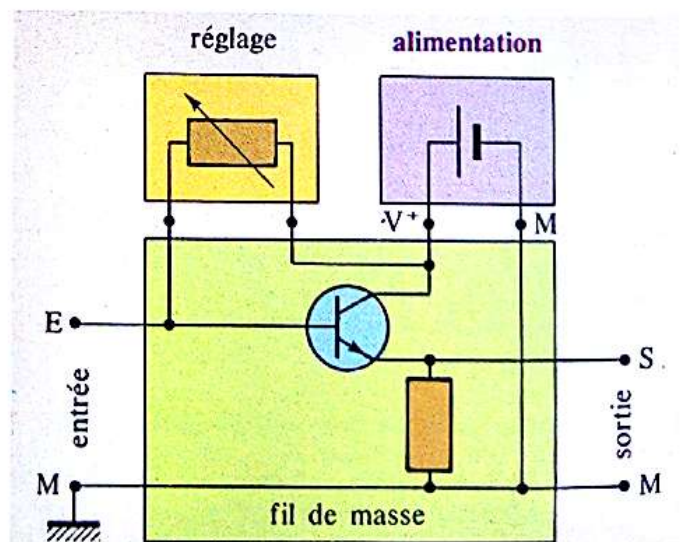
Les circuits intégrés sont des dispositifs électroniques complexes, miniaturisés : on peut y trouver quelques centaines, voire des milliers de transistors judicieusement associés sur une surface de quelques millimètres carrés (*photo 1*).

De l'extérieur, on voit un boîtier en résine d'où sortent des « pattes » destinées aux connexions. Le « type » du circuit intégré est inscrit sur le boîtier. Cette référence permet de consulter une fiche technique où le constructeur précise les caractéristiques ainsi que les valeurs limites à ne pas dépasser.

Seuls des spécialistes sont capables de comprendre le fonctionnement interne de ces circuits intégrés complexes. Nous nous contenterons, dans la suite, d'aborder quelques caractéristiques et modes d'utilisation des seuls amplificateurs opérationnels.

12.2 connexions d'un A.O.

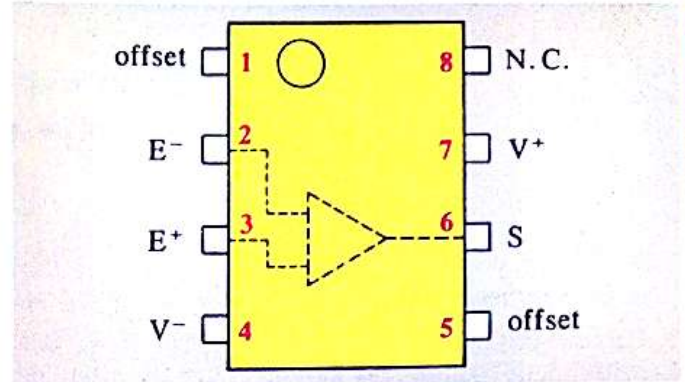
Dans le montage de la figure 3, vous reconnaissez un transistor : il pourrait être vendu enfermé dans un boîtier de résine. Le constructeur préciserait le rôle des



3. Montage élémentaire à transistor.

connexions, la f.é.m. du générateur pour l'alimenter et indiquerait comment utiliser ce dispositif électronique. De la même façon, un A.O. possède généralement 8 bornes (dont une non connectée) (fig. 4) :

- deux bornes d'entrée E^+ et E^- ,
- une borne de sortie S ,
- deux bornes V^+ et V^- pour brancher son alimentation,
- deux bornes « offset » pour le réglage (dans la plupart des montages simples, le réglage n'est pas nécessaire).



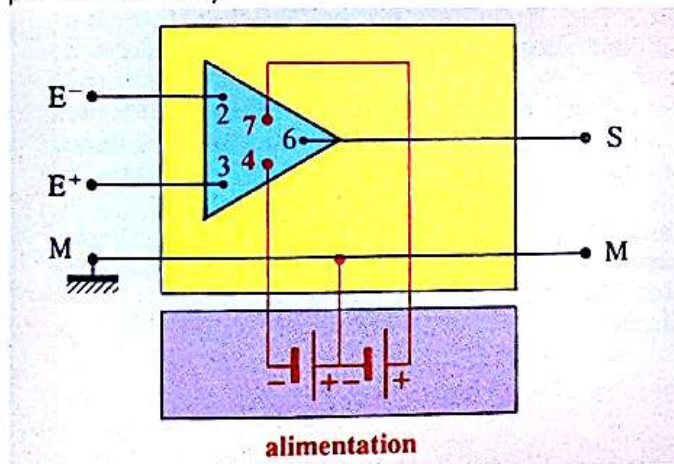
4. Brochage DIL à 8 pattes.

(A. O. : 741-SFC 2741-LM 741 National Semiconductor; MC 1741 Motorola; SN 72741 Texas Instruments.)

12.3 fonctionnement

La tension de sortie V_S (entre S et la masse M) est commandée par la tension d'entrée $V_{E^+} - V_{E^-}$, tout comme un transistor peut être commandé par son courant base.

Pour fonctionner, il faut à l'A.O. une source d'énergie extérieure que nous appelons l'« alimentation » (fig. 5), délivrant généralement des tensions opposées (par exemple $+9\text{ V}$ et -9 V).



5. Branchement d'un A. O. L'alimentation peut être constituée de 2 piles 9 V (alcalines si possible).

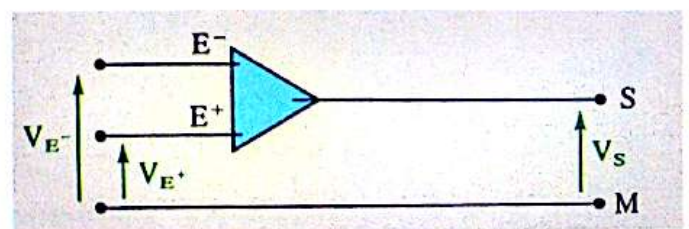
Pour une utilisation correcte de l'A.O., les tensions appliquées sur les entrées ne doivent pas dépasser les tensions délivrées par l'alimentation.

Pour simplifier, lorsqu'on symbolise l'A.O. (fig. 6), ni l'alimentation, ni le dispositif de réglage ne sont représentés.

Lorsque l'A. O. fonctionne en régime linéaire, sa structure interne impose les spécificités suivantes :

- $V_{E^+} - V_{E^-} \approx 0$;
- les courants qui entrent par les bornes E^+ et E^- sont pratiquement indécélables. Nous les considérerons comme nuls.

Dans les montages des fiches expérimentales, nous allons mettre en évidence quelques-unes des multiples ressources de l'A. O.



6. Représentation symbolique d'un A. O.

Fiche expérimentale 1

réalisation d'un voltmètre électronique

• Réalisation d'une pile et mesure de sa f.é.m.

Un morceau de métal cuivre plongé dans une solution de sulfate de cuivre et un morceau de métal zinc plongé dans une solution de sulfate de zinc peuvent constituer une pile, si un morceau de papier filtre imbibé des deux solutions assure la jonction entre les deux compartiments.

Un voltmètre électronique mesure : $u_{PN} = 1,08 \text{ V}$ environ. Un voltmètre ordinaire (fig. 7) mesure une tension nettement plus faible, par exemple $0,3 \text{ V}$. Pourquoi une telle différence?

La pile et le voltmètre constituent un circuit électrique. L'intensité I du courant dans ce circuit est donnée par la loi de Pouillet :

$$I = \frac{E}{r + R_V}$$

avec $\begin{cases} E : \text{f.é.m. de la pile, } r \text{ sa résistance;} \\ R_V : \text{résistance du voltmètre.} \end{cases}$

La tension aux bornes du voltmètre (tension mesurée) vaut :

$$U_V = R_V \cdot I = \frac{R_V \cdot E}{r + R_V}$$

$$U_V = \frac{E}{1 + \frac{r}{R_V}}$$

• Utilisation d'un A. O.

Réalisons le montage de la figure 8 :

- alimentons l'A. O. avec 2 piles de 9 V ;
- court-circuitons E^- et S ;
- branchons notre pile entre E^+ et un fil qui nous servira de masse M ;
- branchons le voltmètre ordinaire entre S et M ;
- relient le point milieu des piles à M .

Le voltmètre ordinaire mesure la tension de sortie $u_{SM} = 1,08 \text{ V}$, égale à la f.é.m. de la pile. Nous venons de construire un voltmètre électronique.

Interprétons : Aucun courant n'entrant par E^+ (propriété de l'A. O.), la pile ne débite pas et

$$V_{E^+} - V_M = E, \quad \text{f.é.m. de la pile.}$$

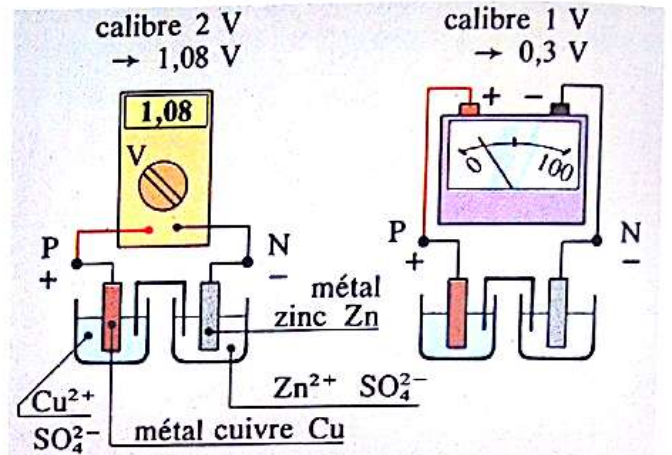
D'autre part :

$$u_{SM} = V_S - V_M = V_{E^-} - V_M.$$

Or $V_{E^-} = V_{E^+}$ (propriété de l'A. O.);

donc $u_{SM} = V_{E^+} - V_M = E$.

Le voltmètre mesure bien E .

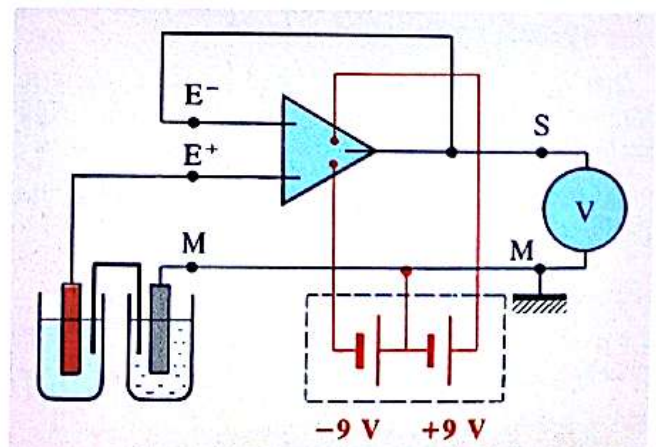


7. La mesure donnée par le voltmètre ordinaire est nettement plus faible que celle donnée par le voltmètre électronique.

Le voltmètre ne mesure donc pas la f.é.m. E , sauf si $r/R_V \ll 1$.

Pour la pile étudiée, r vaut une dizaine de milliers d'ohms, le voltmètre électronique a une résistance interne de l'ordre du mégohm ($10^6 \Omega$). Dans ce cas $r/R_V \ll 1$ et $U_V \approx E$.

Par contre, la résistance du voltmètre ordinaire vaut 5000Ω . Dans ce cas r/R_V est de l'ordre de 2 et $U_V \neq E$.



8. Utilisation d'un A. O. en voltmètre.

Fiche expérimentale 2

réalisation d'un amplificateur de tension

- Une tension trop faible ne peut être mesurée avec un voltmètre ordinaire

Dans le circuit de la figure 9 circule un courant très faible :

$$I = \frac{E}{\Sigma R} = \frac{1,5}{100 + 10^6} \approx 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ A.}$$

La tension aux bornes de la résistance de 100 Ω n'est donc que :

$$u = R \cdot I = 100 \times 1,5 \cdot 10^{-6} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ V} = 0,15 \text{ mV.}$$

La plupart des voltmètres ne mesurent pas une si faible tension; d'où la nécessité de l'amplifier, préalablement à la mesure.

- L'A.O., multiplicateur de tension

Associés à l'A.O. deux conducteurs ohmiques R_1 et R_2 comme l'indique la figure 10.

Appliquons la faible tension u à l'entrée de l'A.O. et branchons le voltmètre à la sortie (calibre 150 mV).

Pour différentes valeurs de R_1 et de R_2 , mesurons la valeur de la tension $v_s = u_{SM}$ et calculons

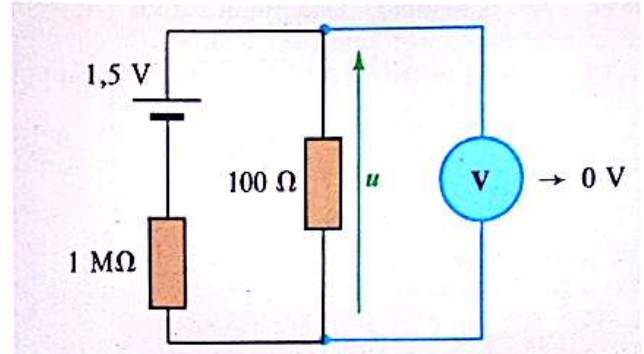
$$G = \frac{v_s}{v_e},$$

avec $v_e = u = 0,15 \text{ mV}$ (en effet, le branchement de l'A.O. aux bornes de la résistance de 100 Ω ne modifie pas la tension u car aucun courant n'entre par la borne E^+ de l'A.O.).

Une étude théorique (voir paragraphe 12.4) montre que :

$$G = 1 + \frac{R_2}{R_1};$$

cette relation est vérifiée par nos mesures.

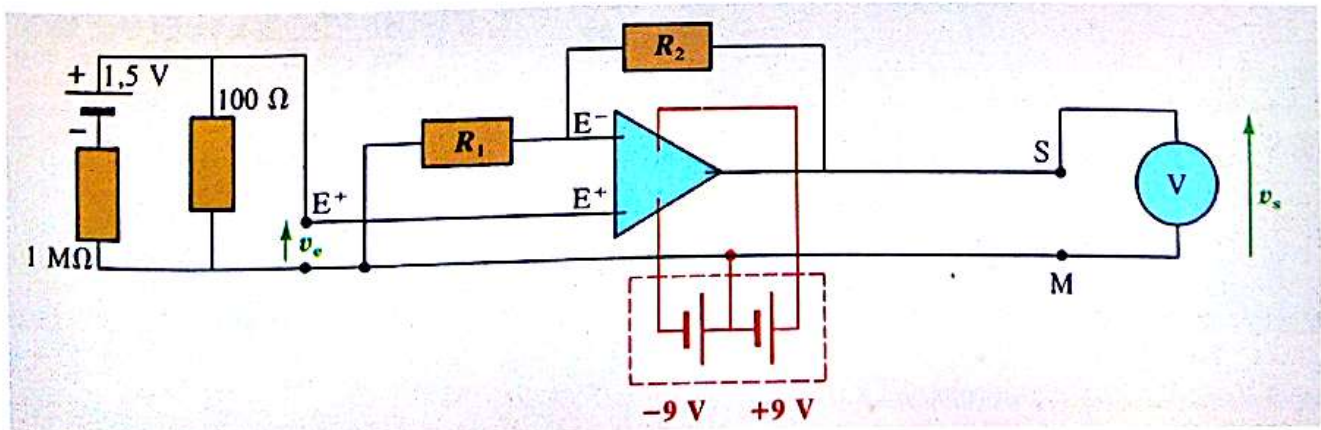


9. La tension u est trop faible pour être mesurée par un voltmètre ordinaire.

$v_e = 0,15 \text{ mV}$			
R_1	R_2	v_s	G
1 kΩ	9 kΩ	1,5 mV	10
100 Ω	9,9 kΩ	15 mV	100
100 Ω	99,9 kΩ	150 mV	1000

L'A.O. effectue l'opération consistant à multiplier la tension d'entrée v_e par le nombre G appelé gain de l'amplificateur.

Cette amplification de tension n'est évidemment possible que grâce à l'énergie fournie par l'alimentation.



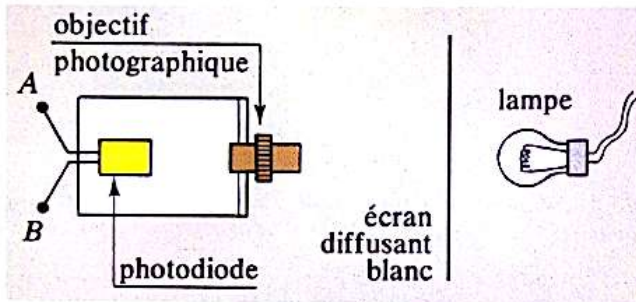
10. La tension u , amplifiée à l'aide d'un A.O., peut maintenant être mesurée avec un voltmètre ordinaire.
 $v_s = G \cdot v_e = G \cdot u.$

• Application pratique : le photomètre

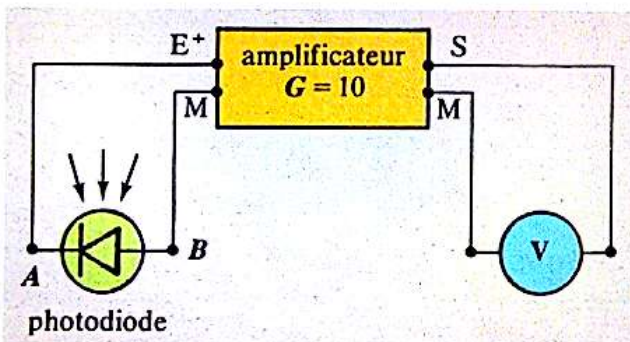
Rappelons qu'une photodiode est un capteur de lumière. Lorsqu'elle est éclairée, une tension apparaît à ses bornes. Mais cette tension, trop faible, ne peut être mesurée avec un voltmètre ordinaire.

Plaçons la photodiode au fond d'un boîtier (fig. 11) dont le couvercle est muni d'un objectif photographique. Cet objectif est situé à 20 cm d'un écran blanc qui diffuse la lumière d'une lampe placée derrière lui.

Branchons la photodiode à l'entrée de notre amplificateur ($G = 10$) et un voltmètre à la sortie.



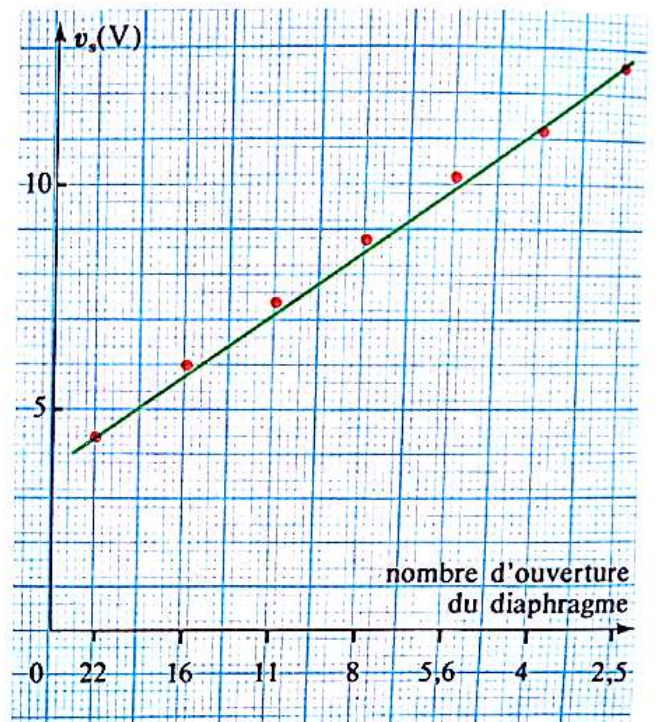
11. Montage d'étude du principe du photomètre.



Modifions le diaphragme de l'objectif : 22, 16, ... 5,6 ... et mesurons la tension amplifiée. Reportons nos valeurs sur un graphique.

Lorsqu'on passe d'un nombre d'ouverture à celui immédiatement inférieur (de 11 à 8 par exemple), la quantité de lumière reçue par la photodiode double. On constate qu'alors la tension augmente d'une quantité constante, d'environ ici 1,3 V.

L'ensemble photodiode-amplificateur-voltmètre peut donc être utilisé pour déterminer une quantité de lumière reçue; nous avons là le principe d'un photomètre.



12.4 approfondissement

Dans le montage amplificateur précédent, établissons la relation :

$$G = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Aucun courant n'entrant par les bornes E^+ et E^- , un même courant I va parcourir R_2 et R_1 .

La loi d'Ohm appliquée entre S et M donne :

$$v_s = (R_2 + R_1) \cdot I,$$

d'où

$$I = \frac{v_s}{R_2 + R_1}$$

Nous avons aussi :

$$v_s = v_s - v_M = (v_s - v_{E^-}) + (v_{E^-} - v_{E^+}) + (v_{E^+} - v_M)$$

Puisque $v_{E^-} = v_{E^+}$ (autre propriété de l'A.O.) :

$$v_s = R_2 \cdot I + v_e$$

car, d'après la loi d'Ohm :

$$v_s - v_{E^-} = R_2 \cdot I.$$

Donc

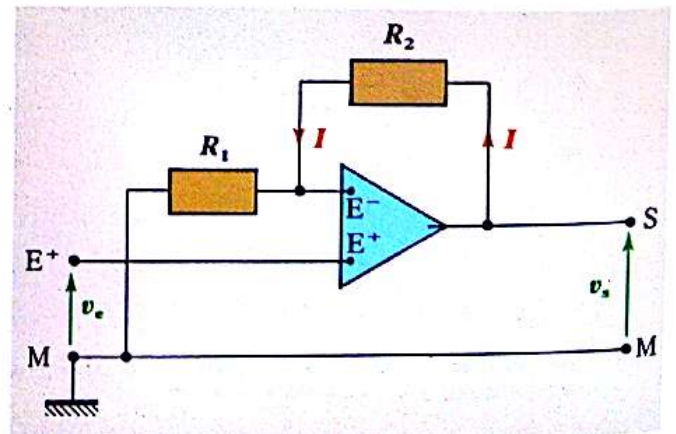
$$v_s = R_2 \cdot \frac{v_s}{R_2 + R_1} + v_e,$$

ou encore

$$v_s \left(1 - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) = v_e$$

d'où

$$G = \frac{v_s}{v_e} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$



DOCUMENT

Les circuits, ou portes logiques

Circuits à deux entrées

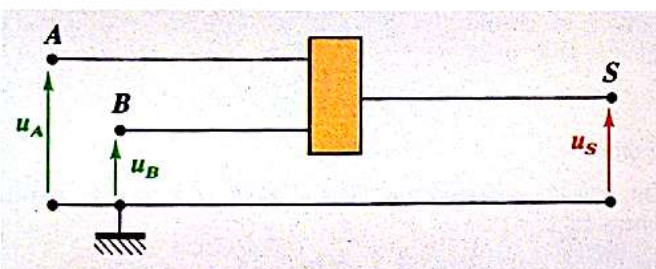
Les composants les plus fréquemment utilisés en électronique sont les *circuits logiques*. Ils sont à la base du fonctionnement des calculatrices et des ordinateurs. Ce sont des circuits intégrés comportant une ou plusieurs entrées aux bornes desquelles on applique des tensions.

Nous prendrons comme exemple les circuits logiques de technologie *T. T. L.* (*Transistor Transistor Logic*) les plus utilisés. Ces « puces » électroniques sont alimentées sous une tension comprise entre 4,5 V et 5,2 V. Nous nous limiterons à des circuits à deux entrées *A* et *B* et une sortie *S*.

Lorsque $0 < u_A < 2,4$ V, on fait correspondre à cette tension le chiffre $x=0$.

Lorsque $2,4 < u_A < 5$ V, on fait correspondre à cette tension le chiffre $x=1$.

De même à u_B est associé le chiffre y et à u_S le chiffre z (y et z ne pouvant prendre que deux valeurs, 0 ou 1).



Le fonctionnement de chaque circuit logique (ou *porte*) est donné par une *table de vérité* où figurent les valeurs de z en fonction des valeurs du couple (x, y) . Donnons-en deux exemples.

Porte ET (AND)

Si u_A et u_B sont comprises entre 2,4 V et 5 V ($x=1$ et $y=1$), alors u_S est aussi comprise entre 2,4 V et 5 V ($z=1$).

Dans tous les autres cas, $u_S < 2,4$ V ($z=0$).

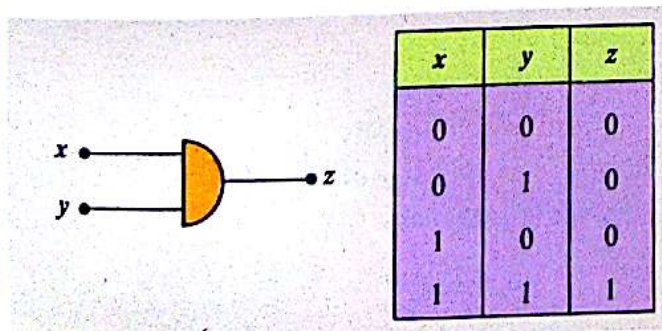


Table de vérité et représentation symbolique d'une porte ET.

Porte NON ET (NAND)

Avec cette porte, $u_S < 2,4$ V ($z=0$) lorsque u_A et u_B sont comprises entre 2,4 V et 5 V ($x=y=1$).

Dans tous les autres cas, $2,4 < u_S < 5$ V ($z=1$).

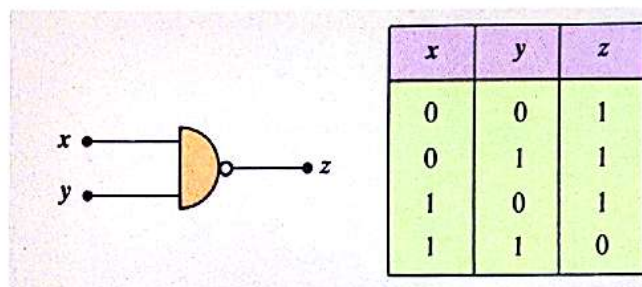
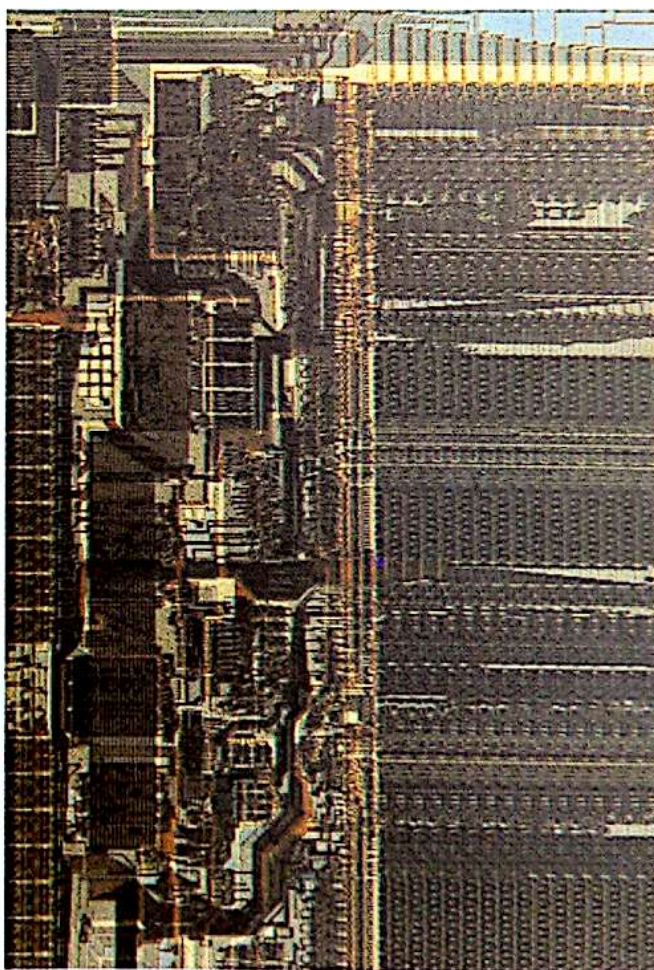


Table de vérité et représentation symbolique d'une porte NAND (NON ET).



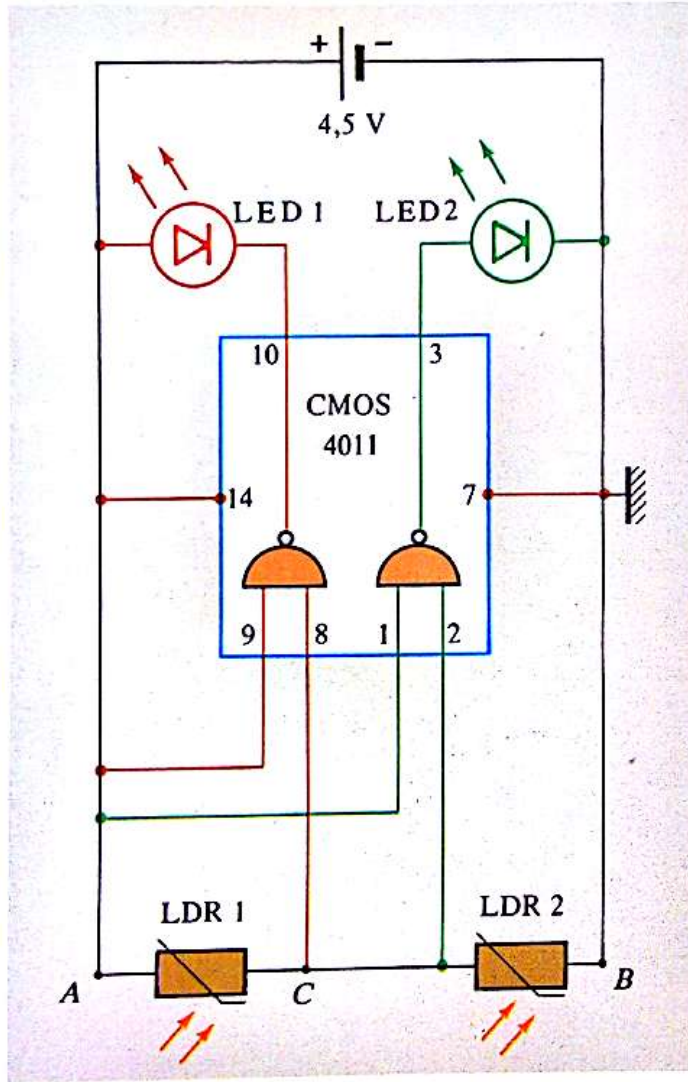
Un microprocesseur (la « puce »), organe central d'un microordinateur, est constitué d'un très grand nombre de portes logiques, interconnectées entre elles et intégrées sur une même pastille de silicium. (Macrophotographie.)

Exemple d'utilisation

Le montage ci-dessous a été proposé par la revue *Argonaute* et utilise le circuit intégré CMOS 4011 (portes NAND). Les circuits logiques sont en général vendus sous forme de petites plaquettes de très petites dimensions à 14 connexions et comportant 4 portes identiques.

Le circuit ci-dessous n'utilisant que 2 portes, des connexions ne seront pas branchées.

Les connexions n° 14 et 7 servent à l'alimentation du circuit intégré.



Les dipôles LED sont des diodes électroluminescentes, qui s'allument lorsqu'un courant suffisant les traverse.

Les dipôles LDR sont des photorésistances. Leur résistance chute brutalement lorsqu'elles sont éclairées.

Réalisons 3 expériences.

Expérience 1

Éclairons les deux LDR. Nous constatons que seule la LED 2 s'éclaire. Interprétons.

Si les deux LDR sont éclairées de la même façon,

$$U_{AC} = U_{CB} = \frac{U_{AB}}{2}$$

Nous avons donc, le point B étant à la masse :

$$U_{AB} = 4,5 \text{ V} \text{ et } U_{CB} = 2,25 \text{ V.}$$

Aux numéros des connexions, faisons correspondre un chiffre : 0 si la connexion a un potentiel inférieur à 2,4 V, 1 dans le cas contraire, la masse servant de référence (potentiel nul).

8 (point C) \mapsto 0 } 10 \mapsto 1 (voir table de vérité d'un NAND).
9 (point A) \mapsto 1 }

Le potentiel de la borne n° 10 est donc compris entre 2,4 V et 4,5 V; la tension (inférieure à 2,4 V) aux bornes de la LED 1 n'est pas suffisante pour la faire briller : elle ne s'allume pas.

De même : 1 (point A) \mapsto 1 } 3 \mapsto 1.
2 (point C) \mapsto 0 }

Le potentiel de la borne n° 3 est compris entre 2,4 V et 4,5 V; la tension (supérieure à 2,4 V) aux bornes de la LED 2 est suffisante pour la faire briller.

Expérience 2

On éclaire seulement la LDR 1. Seule s'allume la LED 1! Interprétons.

La tension u_{AC} est faible, et $u_{CB} \approx 4,5 \text{ V}$.

8 \mapsto 1 } 10 \mapsto 0.
9 \mapsto 1 }

Le potentiel de la borne n° 10 chute; la tension aux bornes de la LED 1 devient suffisante pour la faire briller.

1 \mapsto 1 } 3 \mapsto 0.
2 \mapsto 1 }

Le potentiel de la borne n° 3 chute; la tension aux bornes de la LED 2 n'est pas suffisante pour la faire briller.

Expérience 3

On éclaire seulement la LDR 2. Seule la LED 2 s'allume $u_{CB} \approx 0$, et $u_{AC} \approx 4,5 \text{ V}$.

8 \mapsto 0 } 10 \mapsto 1
9 \mapsto 1 }
1 \mapsto 0 } 3 \mapsto 1
2 \mapsto 0 }

On retrouve le premier cas.

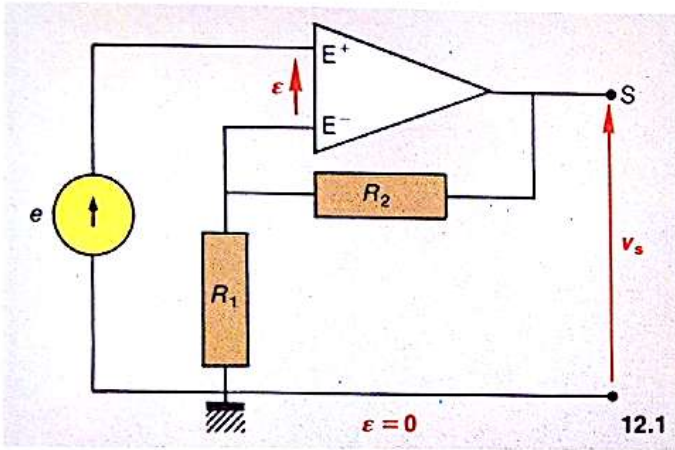
Montages types

Les A.O. sont utilisés, dans ces exercices, en régime linéaire. On rappelle que, dans ces conditions, il n'entre ni ne sort aucun courant par les bornes E^+ et E^- , et que :

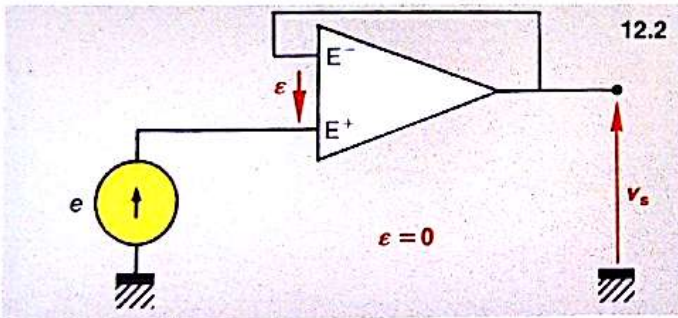
$$\epsilon = V_{E^+} - V_{E^-} = 0.$$

Les alimentations $+15\text{ V}$ et -15 V ne sont pas représentées.

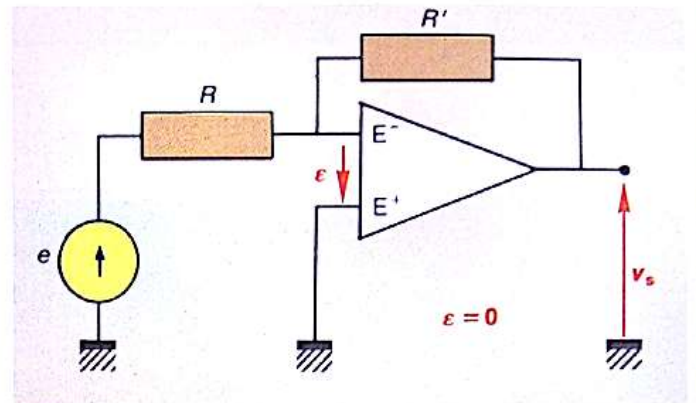
12.1 *Amplificateur non inverseur.* On considère un amplificateur opérationnel idéal monté comme l'indique le schéma ci-après. Exprimer le rapport v_s/e en fonction de R_1 et R_2 . Calculer ce rapport pour $R_2 = 40\text{ k}\Omega$ et $R_1 = 10\text{ k}\Omega$.



12.2 *Montage suiveur.* Soit le montage schématisé ci-après. Calculer le rapport v_s/e . Préciser l'intérêt de ce montage.



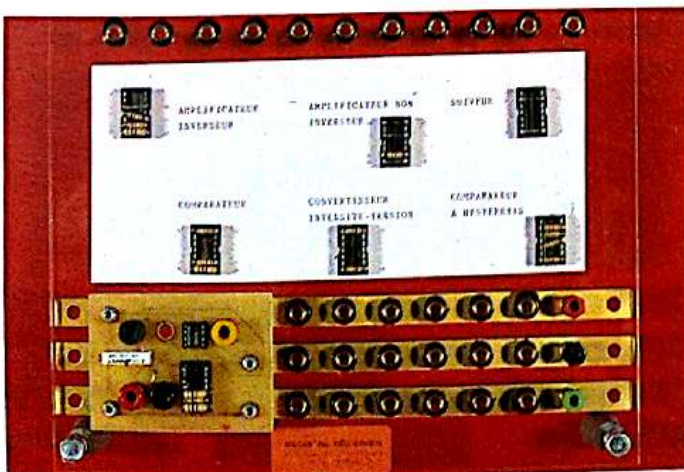
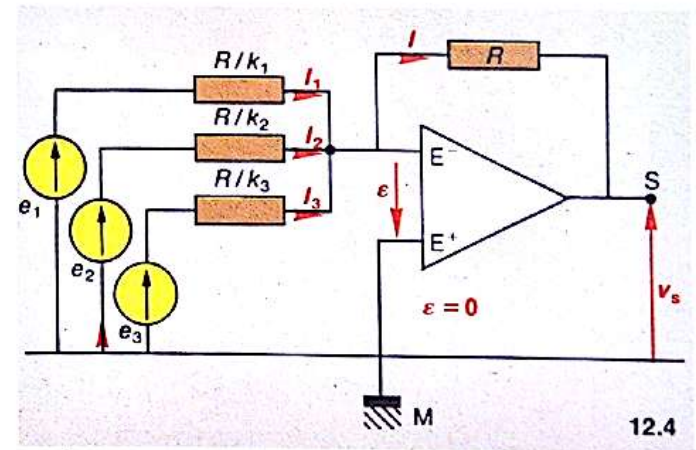
12.3 *Montage inverseur.* On considère le montage ci-après.



- 1/ Si I est l'intensité du courant dans R , quelle est l'intensité du courant qui parcourt R' ?
- 2/ En déduire une relation entre I , e et v_s .
- 3/ Trouver une autre relation avec I .
- 4/ Exprimer v_s/e en fonction de R et R' .
- 5/ Calculer ce rapport pour $R' = 10\text{ k}\Omega$, $R = 1\text{ k}\Omega$.

12.4 *Montage sommateur.* k_1, k_2, k_3 sont des nombres entiers. Montrer que la tension de sortie peut se mettre sous la forme :

$$v_s = - \sum_{i=1}^{i=3} k_i \cdot e_i.$$



Plaquette expérimentale comportant un amplificateur opérationnel et un dispositif interchangeable permettant d'obtenir différentes fonctions (suiveur, inverseur, etc.). Réalisation Patrick Neel (Lycée Thiers, Marseille).

MÉCANIQUE



13.1 mouvement

13.1.1 relativité du mouvement

Un objet est en mouvement, par rapport à un autre objet qui sert de référence, s'il se déplace, si sa position change par rapport à cet objet.

Observons le dessin ci-contre. La voiture se déplace par rapport à la route, aux arbres, aux maisons, qui constituent un référentiel.

Sophie, la passagère endormie, est en mouvement par rapport à la route; mais elle est immobile par rapport à la carrosserie de la voiture choisie comme référentiel. Une guêpe, enfermée dans la voiture, vole en tous sens. Par rapport à la carrosserie, sa vitesse n'excède pas quelques décimètres par seconde. Mais par rapport aux arbres, sa vitesse est grande, peu différente de celle de la voiture.

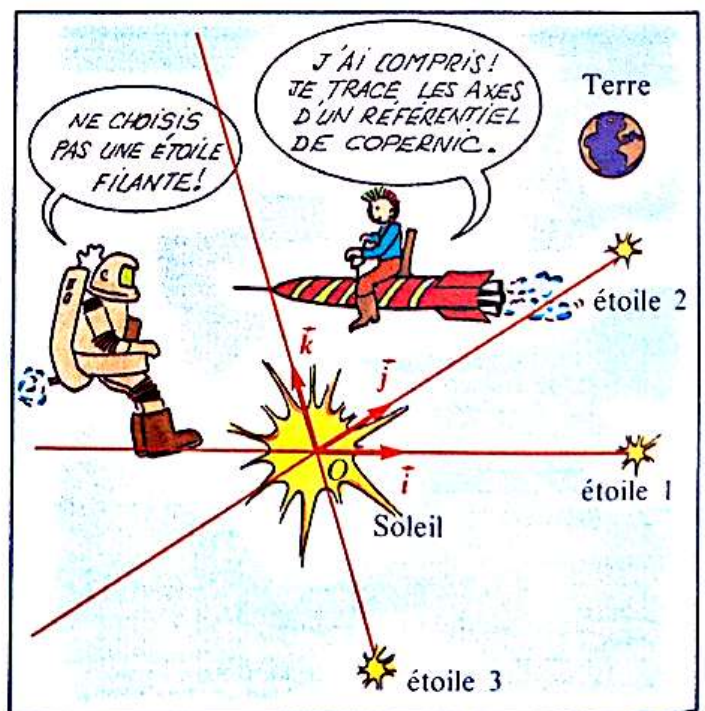
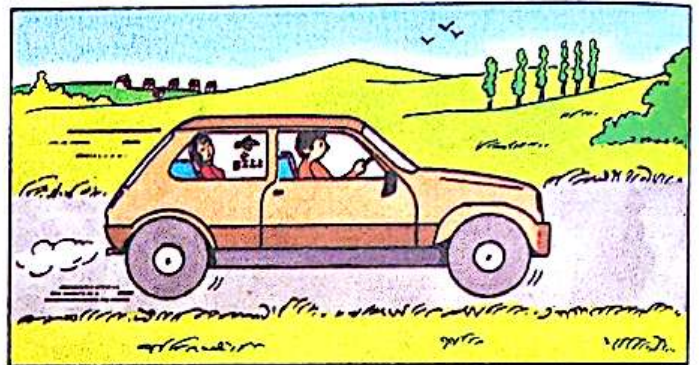
- Les notions de déplacement, de mouvement et de vitesse, sont relatives au référentiel choisi.

13.1.2 quel référentiel choisir?

Dans la vie courante, la Terre et tout ce qui s'y rattache (routes, arbres, maisons) constituent notre référentiel. Lorsque nous parlons de mouvement sans préciser par rapport à quoi, c'est qu'il s'agit implicitement du référentiel terrestre.

Un oiseau qui vole est en mouvement par rapport à la Terre et aussi par rapport aux nuages. Ceux-ci, qui se déforment au gré du vent, ne peuvent servir de référentiel. On choisit pour référentiel des systèmes qu'on peut considérer comme indéformables ou «solides de référence».

Pour étudier le mouvement de la Terre, des planètes, d'un vaisseau spatial, le référentiel adopté par les scientifiques est le **référentiel de Copernic**. Il est constitué par un solide imaginaire fait de trois axes dont les directions sont déterminées par trois étoiles, très éloignées, et qui concourent en un point très proche du centre du Soleil.



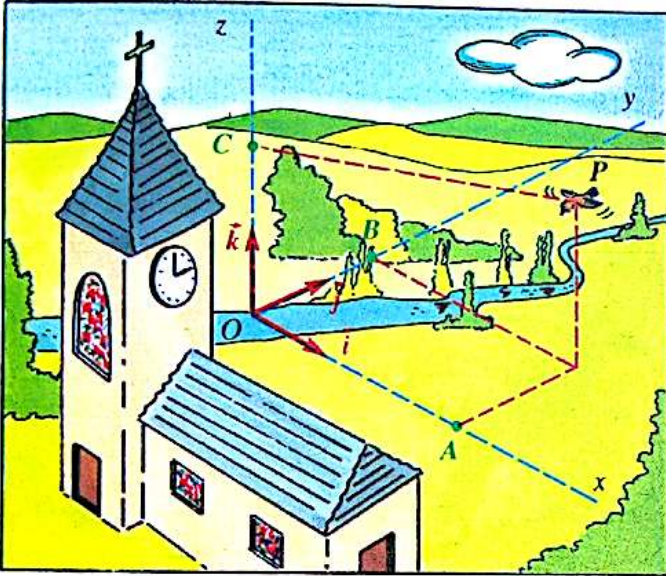
1. O est le centre du système solaire, les trois étoiles fixent les directions des axes. Un tel référentiel est utilisé pour l'étude du mouvement des planètes et des sondes interplanétaires.

13.1.3 position, date et mouvement

L'oiseau en vol (fig. 2) est en mouvement par rapport au référentiel terrestre. Sa position par rapport au clocher change à chaque instant.

Pour situer l'oiseau à un instant donné, on associe un repère orthonormé au clocher, solide de référence. Ce repère comporte une origine O que l'on choisit arbitrairement et trois axes Ox , Oy , Oz perpendiculaires et orientés par les vecteurs unitaires \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} .

L'ensemble constitue le repère orthonormé $\mathcal{R}(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$.



2. L'oiseau est en mouvement par rapport à l'église. La date t de l'instant considéré est repérée par l'horloge du clocher. La position de l'oiseau, P , est repérée par ses coordonnées (x, y, z) dans le repère $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$:

$$\vec{OP} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}.$$

La position P de l'oiseau est projetée orthogonalement en A sur Ox , en B sur Oy , en C sur Oz . Les vecteurs $\vec{OA} = x\vec{i}$, $\vec{OB} = y\vec{j}$ et $\vec{OC} = z\vec{k}$ sont les projections orthogonales du vecteur position \vec{OP} . Les coordonnées x , y et z du vecteur position \vec{OP} permettent de situer l'oiseau à l'instant t , par rapport au repère \mathcal{R} .

L'oiseau étant en mouvement, ses coordonnées changent au cours du temps.

Une horloge permet de repérer, de dater les instants : c'est un repère de dates qui associe une date à chaque position d'un point en mouvement.

- Un repère d'espace et un repère de dates permettent de situer un point mobile, dans l'espace et dans le temps.

13.1.4 trajectoire

- Dans un repère donné, la trajectoire d'un point mobile est l'ensemble des positions occupées successivement par ce point lors de son mouvement.

Cet ensemble de positions constitue une ligne.

La trajectoire d'un point quelconque de la carrosserie d'une voiture qui se déplace en ligne droite est rectiligne.

Application 1 :

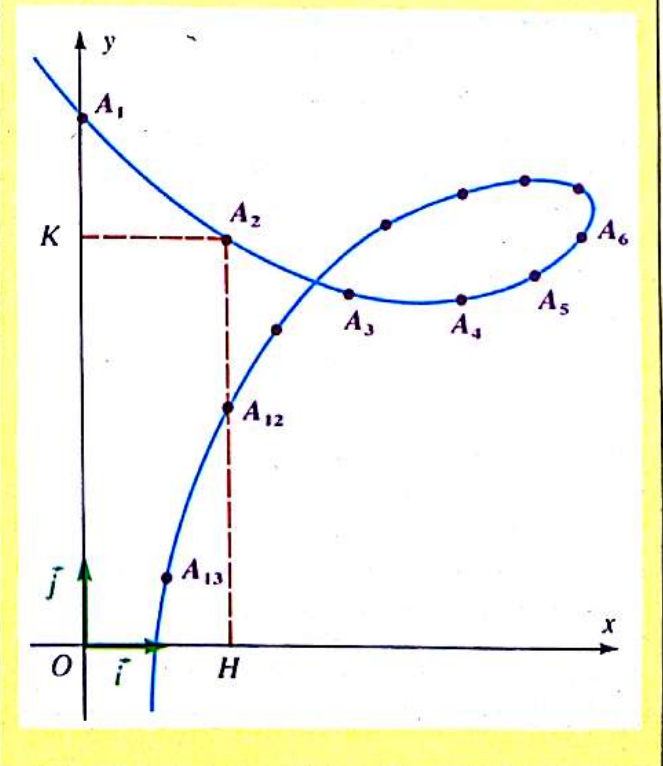
Positionnons le point A_2 de la courbe ci-dessous. Pour cela, donnons les coordonnées de ce point dans le repère (O, \vec{i}, \vec{j}) . L'unité de longueur est le centimètre.

Projetons orthogonalement le point A_2 sur les axes Ox et Oy . Nous mesurons $OH = 1,7$ cm et $OK = 4,5$ cm.

Donc $\vec{OH} = 1,7\vec{i}$ et $\vec{OK} = 4,5\vec{j}$,
et $\vec{OA}_2 = \vec{OH} + \vec{OK} = 1,7\vec{i} + 4,5\vec{j}$.

Les coordonnées de A_2 sont donc, en cm :

$$x = 1,7 \text{ et } y = 4,5.$$



L'un des points d'un mobile glissant sur une table à coussin d'air (voir fiche expérimentale ou application 1) marque sa position à intervalles de temps successifs et égaux. Il est possible ainsi de reconstituer la trajectoire *curviligne* de ce point.

Comme le mouvement, la trajectoire dépend du référentiel choisi pour faire l'observation.

13.2 vitesse

13.2.1 vitesse moyenne

Un conducteur sait calculer « sa moyenne ». A un trajet de 240 km effectué en 3 heures, correspond une vitesse moyenne de $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Il lui suffit de faire le quotient de la distance parcourue ℓ par la durée θ correspondante :

$$v = \frac{\ell}{\theta} = \frac{240}{3} = 80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}.$$

L'unité de vitesse est le quotient de l'unité de longueur (m, km, mille...) par l'unité de durée (s, h, min...). Dans le système international, l'unité de vitesse est le mètre par seconde (symbole : $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

$$v = \frac{\ell}{\theta}$$

$\begin{matrix} \text{m} \\ \swarrow \\ \ell \\ \downarrow \\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \\ \swarrow \\ \theta \\ \downarrow \\ \text{s} \end{matrix}$

Le kilomètre par heure (symbole : $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$) est couramment utilisé ($1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 3,6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$). Les marins emploient le nœud (un mille marin par heure, soit $1,852 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$).

Voici quelques ordres de grandeur de vitesses :

coureur de 100 m	36 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	son	1 200 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$
record cycliste de l'heure	51 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	fusée	30 000 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$
formule 1	350 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	lumière dans le vide	$1,08 \cdot 10^9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

13.2.2 vitesse instantanée

Un automobiliste regarde, à un instant donné, le compteur de vitesse (tachymètre) et lit une vitesse instantanée : $72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. A cet instant, son véhicule a une vitesse qui lui permettrait, en continuant ainsi, de parcourir 72 km en 1 h. Un coup de frein ou une accélération, et, « l'instant qui suit », la vitesse change...

Nous pouvons, à chaque instant t , attribuer une valeur à la vitesse v de la voiture. La vitesse instantanée est une fonction du temps notée $v(t)$:

$$t \mapsto v(t).$$

La vitesse instantanée peut être évaluée en mesurant la vitesse moyenne entre deux dates très proches encadrant la date t (voir applications 4 et 5 et fiche expérimentale).

Lorsque la vitesse instantanée est constante, le mouvement est dit *uniforme*. Le mouvement est dit *accélééré* lorsque la vitesse instantanée augmente, *retardé* quand cette vitesse diminue.



3. Le tachymètre indique la vitesse instantanée de l'automobile : $72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Application 2 :

La Norvégienne Ingrid Kristiansen a battu en 1985 le record du monde de marathon féminin (42,195 km) en 2 h 21 min 26 s, soit 3 min 30 s de moins que le temps d'Alain Mimoun en 1956 (médaillon d'or aux jeux Olympiques). Calculez sa vitesse moyenne en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ puis en $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Ingrid Kristiansen a parcouru 42 195 m en 2 h 21 min 26 s, soit en 8 486 s. Sa vitesse moyenne est donc égale à :

$$v = \frac{42\,195}{8\,486} = 4,97 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

En kilomètres/heure :

$$v = 4,97 \times 3,6 = 17,9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}.$$

Application 3 :

La platine d'un tourne-disque tourne régulièrement, faisant 45 tours par minute ($\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$). Calculer la vitesse d'un de ses points situé à 15 cm de l'axe de rotation.

La durée d'un tour est :

$$\theta = \frac{60}{45} = 1,33 \text{ s}.$$

Pendant cette durée, le point parcourt la circonférence d'un cercle de rayon 15 cm, soit :

$$\ell = 2\pi R = 0,942 \text{ m}.$$

La vitesse de ce point vaut donc :

$$v = \frac{0,942}{1,33} = 0,71 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Application 4 :

Sachant que les photos de la figure 4 sont prises tous les 1/30 s, estimer la vitesse instantanée de la bille lors des 8^e, 10^e, 12^e et 14^e photos. Que constate-t-on ?

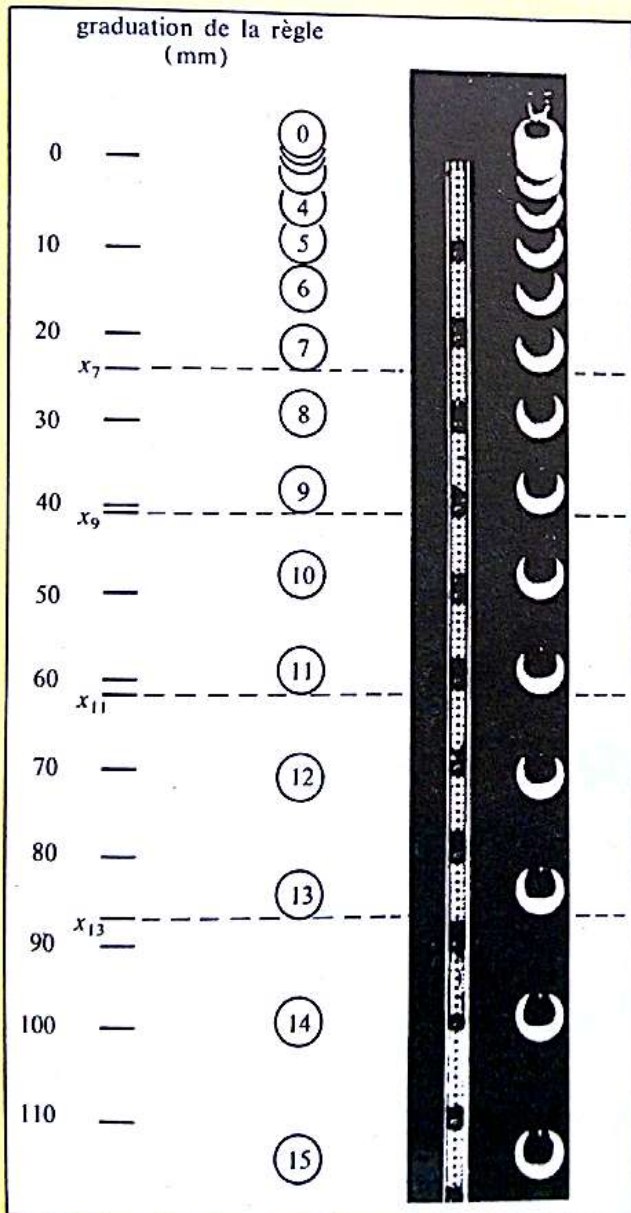
Désignons par A_i les positions successives de la bille et par t_i les dates correspondantes. La vitesse instantanée diffère peu de la vitesse moyenne entre deux dates très proches encadrant la date considérée. Ainsi :

$$v_8 \approx \frac{A_7 A_9}{t_9 - t_7} = \frac{1,6}{2/30} = 24 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}.$$

De même :

$$v_{10} \approx 30 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}; \quad v_{12} \approx 37 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}; \\ v_{14} \approx 43 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}.$$

La vitesse croît régulièrement; le mouvement est rectiligne accéléré.



Application 5 :

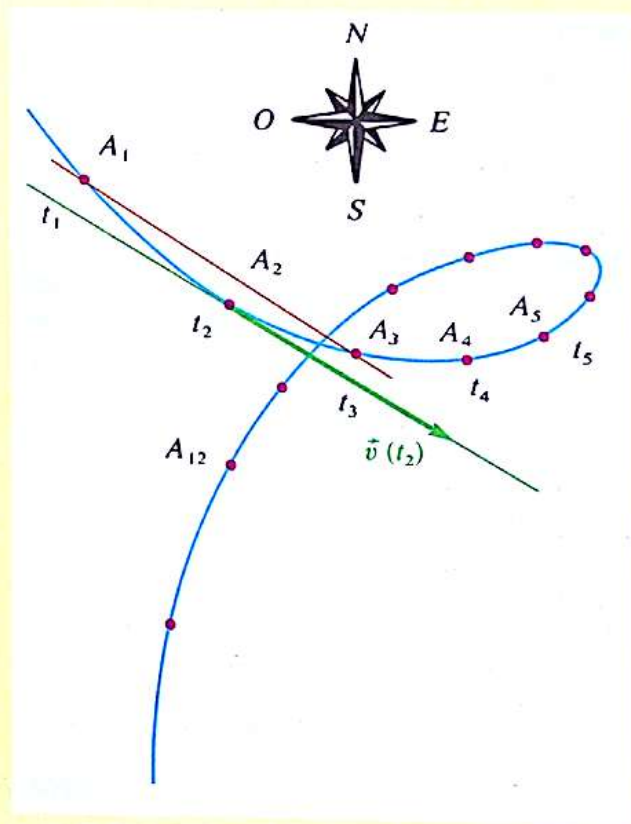
Le point A d'un mobile en mouvement sur une table à coussin d'air (voir document p. 156) marque sa position sur la table toutes les $2 \cdot 10^{-2}$ s (fig. 5). Déterminer sa vitesse instantanée à la date t_2 .

La vitesse instantanée à la date t_2 diffère peu de la vitesse moyenne entre les deux dates t_1 et t_3 très proches qui encadrent t_2 :

$$v_2 \approx \frac{A_1 A_3}{t_3 - t_1} \approx \frac{A_1 A_3}{t_3 - t_1};$$

$t_3 - t_1 = 40$ ms et on mesure $A_1 A_3 = 3,7$ cm, d'où :

$$v_2 = \frac{3,7 \cdot 10^{-2}}{40 \cdot 10^{-3}} = 0,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$



5. La « flèche » portée par la tangente à la trajectoire indique la direction et le sens du mouvement à l'instant de date t_2 .

A l'échelle $1 \text{ cm} \longleftrightarrow 0,30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, c'est l'image du vecteur vitesse $\vec{v}(t_2)$ de norme $0,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (voir § 13.3).

◀ 4. Chronophotographie du mouvement vertical de chute libre d'une bille; la bille est photographiée tous les 1/30 de seconde. Document à l'échelle 1.

13.3 modèle mathématique : vecteur vitesse

Pour caractériser le mouvement du point A de l'application 5, nous devons ajouter qu'à l'instant t_2 , ce point mobile allait vers le sud-est. Pour être plus précis, il allait dans la direction de la tangente à la trajectoire au point A_2 occupé à la date t_2 . L'instant d'après, cette direction change.

Une flèche portée par la tangente à la trajectoire permet d'indiquer la direction et le sens du mouvement à un instant donné.

Plus généralement, le mouvement d'un point mobile A , à l'instant t , est caractérisé dans le référentiel d'observation du mouvement par :

- une direction : celle de la tangente à la trajectoire au point occupé à cet instant;
- un sens;
- une mesure, celle de la vitesse instantanée $v_A(t)$.

Cela nous incite à considérer la vitesse comme un vecteur noté $\vec{v}_A(t)$ (plus simplement \vec{v}_A), fonction du temps :

$$t \mapsto \vec{v}_A(t).$$

- Le vecteur vitesse instantanée $\vec{v}_A(t)$ caractérise la direction et le sens du mouvement du point A à l'instant t . Sa norme $\|\vec{v}_A(t)\| = v_A$ est égale à la mesure de la vitesse instantanée.

Nous schématiserons donc le vecteur vitesse (vecteur du plan de la feuille) par une flèche de même direction que la tangente à la trajectoire et indiquant le sens du mouvement. La longueur de cette flèche dépendra de l'échelle choisie.

Application 6 :

Le long d'une route sinueuse, la vitesse d'une voiture de rallye change selon sa position. Ainsi, en A , B et C , les vitesses instantanées sont respectivement :

$$30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}, 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}, 110 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}.$$

Représenter les vecteurs vitesses instantanées à l'échelle : $1 \text{ cm} \longleftrightarrow 20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

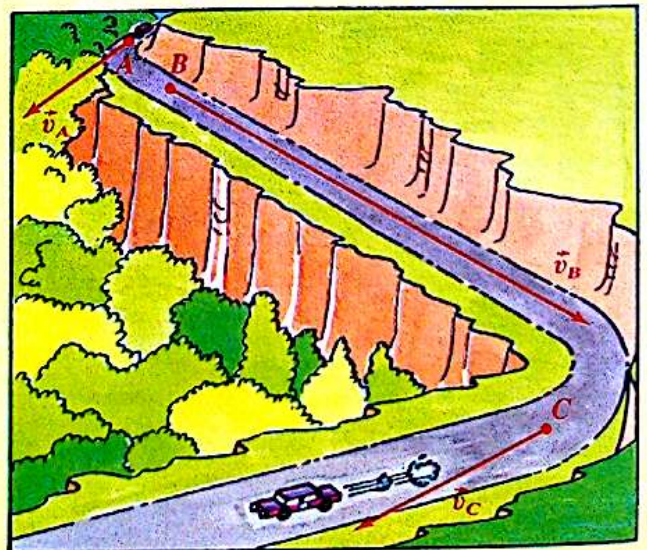
Les vecteurs vitesses instantanées \vec{v}_A , \vec{v}_B et \vec{v}_C sont tangents à la trajectoire de la voiture.

Ils ont pour normes :

$$30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}, 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}, 110 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}.$$

Les flèches qui les représentent auront respectivement les longueurs :

$$\frac{30}{20} = 1,5 \text{ cm}, \quad \frac{50}{20} = 2,5 \text{ cm}, \quad \frac{110}{20} = 5,5 \text{ cm}.$$



Fiche expérimentale

détermination et schématisation d'un vecteur vitesse (voir document p. 156)

Un palet sur coussin d'air est lancé en tournoyant. L'un de ses points, A , marque ses positions successives : $A_1, A_2, \dots, A_i, \dots$ aux dates $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots$, qui sont espacées de la même durée $\tau = 0,02$ s. Ces positions nous permettent de reconstituer la trajectoire de ce point (fig. 6). Proposons-nous de déterminer le vecteur-vitesse du point A à une date donnée, t_5 par exemple. Notons $\vec{v}(t_5) = \vec{v}_5$ ce vecteur vitesse.

• **Direction** : Tracer la tangente à la trajectoire au point A_5 . Le vecteur \vec{v}_5 est parallèle à cette tangente. Remarque que cette tangente est pratiquement parallèle au bipoint (A_4, A_6) ; A_4 et A_6 encadrent le point A_5 .

• **Sens** : De A_4 vers A_6 ; le vecteur \vec{v}_5 a pratiquement la même orientation que le vecteur $\overrightarrow{A_4A_6}$.

• **Norme** : C'est la mesure de la vitesse, $\|\vec{v}_5\| = v_5$. La norme du vecteur vitesse est pratiquement égale à la vitesse moyenne entre les instants t_4 et t_6 :

$$v_5 \approx \frac{\overline{A_4A_6}}{t_6 - t_4}.$$

Il faut évaluer la longueur du trajet curviligne $\overline{A_4A_6}$; avec A_4 et A_6 proches, cette longueur diffère peu de la distance $d(A_4, A_6) = \|\overrightarrow{A_4A_6}\|$:

$$v_5 \approx \frac{\|\overrightarrow{A_4A_6}\|}{t_6 - t_4}.$$

Finalement, puisque \vec{v}_5 et $\overrightarrow{A_4A_6}$ sont pratiquement deux vecteurs colinéaires et de même sens, on peut écrire :

$$\vec{v}_5 \approx \frac{\overrightarrow{A_4A_6}}{t_6 - t_4}.$$

Remarquons bien que ce résultat n'est valable qu'avec deux dates très proches encadrant la date t_5 qui nous intéresse.

Mesurons la distance $d(A_4, A_6) = 1,5$ cm.
Or $t_6 - t_4 = 2 \times 0,02 = 0,04$ s; d'où :

$$v_5 = \frac{1,5}{0,04} = 37,5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}.$$

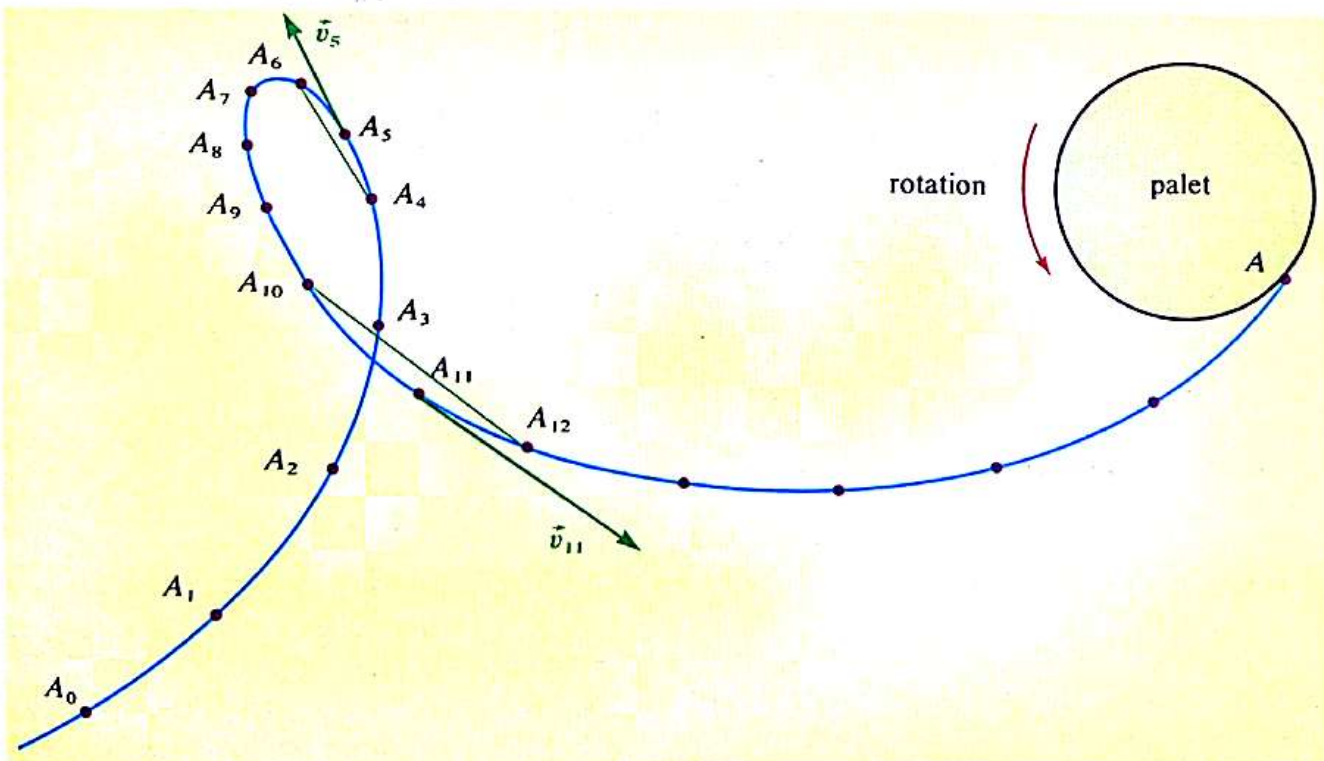
• **Schématisation** : Pour schématiser le vecteur vitesse \vec{v} , adoptons l'échelle de représentation suivante :

$$1 \text{ cm} \leftrightarrow 25 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1};$$

$$\text{donc } 1,5 \text{ cm} \leftrightarrow 37,5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Le vecteur image de \vec{v}_5 , dessiné sur le schéma, est donc parallèle à la tangente en A_5 , et de longueur 1,5 cm.

Notons qu'avec cette échelle très particulière $v_5 = d(A_4, A_6)$. On a tracé de la même façon, sur la figure 6, le vecteur \vec{v}_{11} .



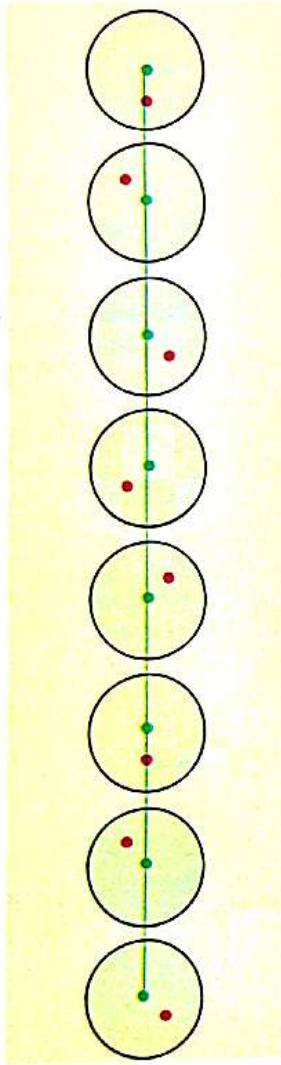
6. Trajectoire du point A d'un palet lancé en tournoyant sur une table à coussin d'air.

13.4 différents types de mouvement

L'étude du vecteur vitesse permet de classer les différents types de mouvement.

Pour un point d'un solide (fig. 7) :

- **Mouvement rectiligne** : le vecteur vitesse conserve la même direction au cours du temps.
- **Mouvement curviligne** : la direction du vecteur vitesse varie au cours du temps.



7. Le centre de ce palet effectue un mouvement rectiligne par rapport à la table à coussin d'air. Le point rouge effectue, lui, un mouvement curviligne.

Pour un solide, le mouvement de chacun de ses points peut être différent. Il existe deux mouvements remarquables que l'on rencontre fréquemment (fig. 8, 9, 10 et 11) :

- **Mouvement de translation** : le solide garde la même orientation dans l'espace; tous ses points ont le même vecteur vitesse instantanée. Ce mouvement peut être rectiligne ou curviligne (fig. 8 et 9).
- **Mouvement de rotation autour d'un axe supposé fixe** : la trajectoire de chaque point du solide est un arc de cercle centré sur l'axe. Entre deux instants donnés, l'angle de rotation est le même pour tous les points du solide. Toutes les machines tournantes possèdent ainsi des pièces en rotation.

Application 7 : Mouvement circulaire uniforme

On considère un point A du plateau d'un manège tournant régulièrement en faisant 8 tr. min^{-1} . Ce point est situé à 2 m de l'axe de rotation. Tracer à 3 dates différentes le vecteur vitesse de ce point. Échelles de représentation :

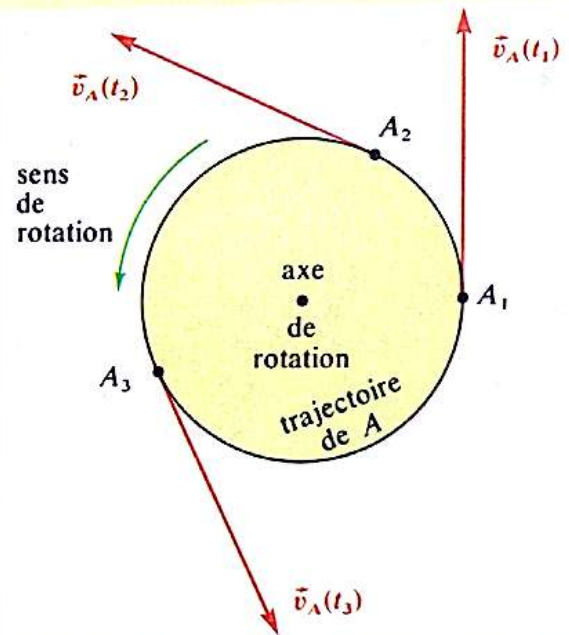
- des longueurs : $1 \text{ cm} \leftrightarrow 1 \text{ m}$;
- des vitesses : $1 \text{ cm} \leftrightarrow 0,5 \text{ m.s}^{-1}$.

Le point A décrit une circonférence de rayon $R = 2 \text{ m}$; sa trajectoire est circulaire. Le plateau tournant régulièrement, son mouvement est uniforme (sa vitesse est constante) : A est animé d'un mouvement circulaire uniforme. Déterminons sa vitesse. En une minute, A parcourt :

$$2\pi \times 2 \times 8 = 100,5 \text{ m.}$$

Sa vitesse est donc : $v_A = \frac{100,5}{60} = 1,67 \text{ m.s}^{-1}$,

et cela, quelle que soit la date considérée (dans la mesure où le manège tourne régulièrement!). Le vecteur vitesse de A à un instant quelconque est donc tangent à la trajectoire circulaire de A, dirigé dans le sens du mouvement et a une norme de $1,67 \text{ m.s}^{-1}$.



8. Mouvement circulaire uniforme. La vitesse est constante; le vecteur vitesse varie.

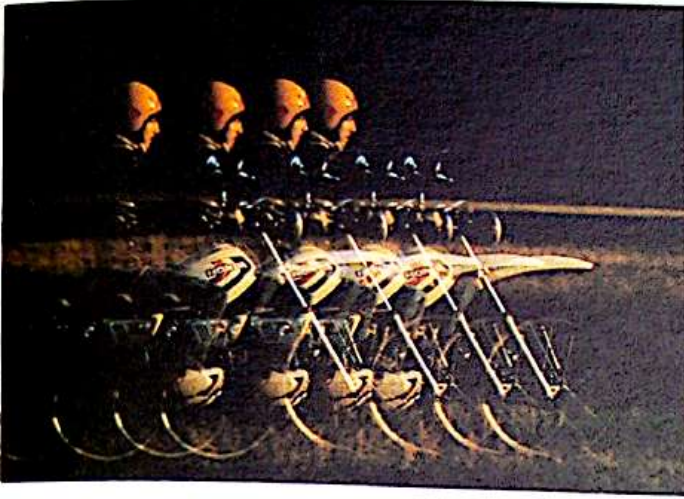
Il est représenté par un vecteur

$$\frac{1,67 \text{ m.s}^{-1}}{0,5 \text{ m.s}^{-1}/\text{cm}} = 3,3 \text{ cm,}$$

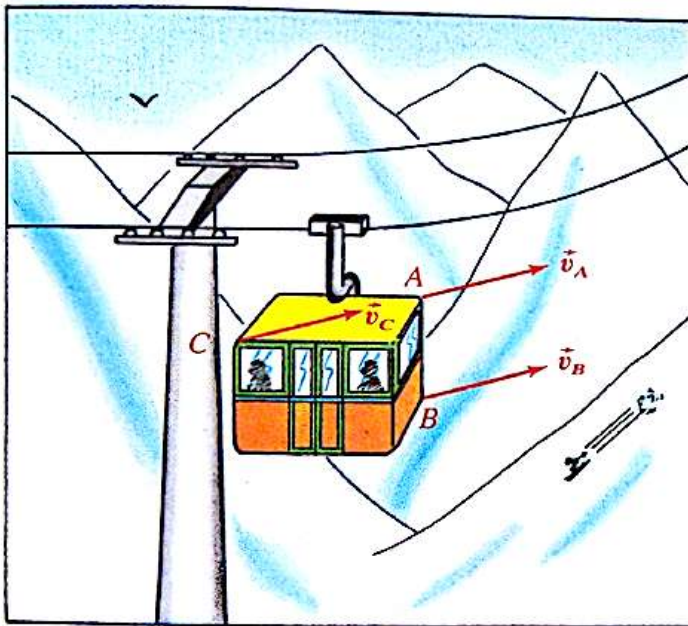
d'après l'échelle adoptée, et tangent au cercle représentant la trajectoire de A, cercle de rayon

$$\frac{2 \text{ m}}{1 \text{ m/cm}} = 2 \text{ cm.}$$

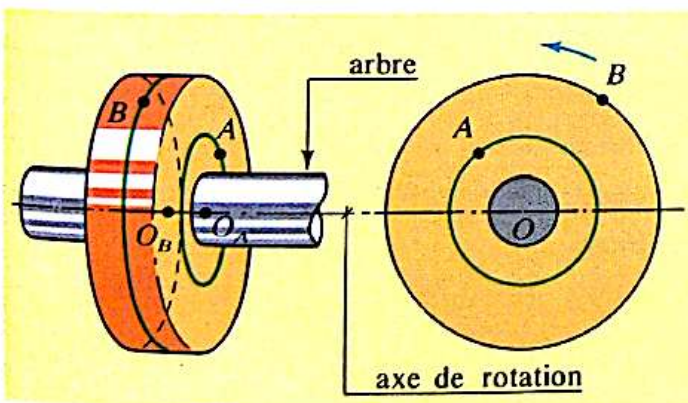
Nous avons là un mouvement où la vitesse est constante, mais où le vecteur vitesse varie.



9. La moto est en translation rectiligne par rapport à la route. Les roues sont en mouvement de rotation autour de leur axe par rapport au motard.



10. La cabine du téléphérique est animée d'un mouvement de translation curviligne; au cours de son mouvement, elle reste parallèle à elle-même.

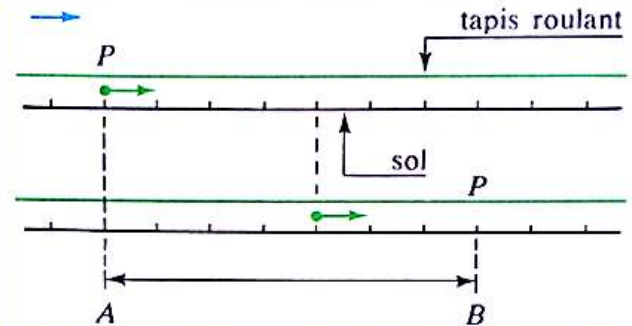


11. Chaque grain de la meule décrit une trajectoire circulaire; il reste à distance constante du centre du cercle qu'il décrit. Les centres des trajectoires, tels O_A et O_B , sont alignés sur une droite appelée axe de rotation. L'arbre est le support matériel qui permet d'assurer et de maintenir le mouvement de rotation de la meule.

Application 8 : Additivité des vitesses

Pascale monte sur un tapis roulant animé par rapport au sol d'une vitesse de $4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Elle décide, pour gagner du temps, de marcher dans le sens du tapis à la vitesse de $3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Quelle est sa vitesse par rapport au sol?

Notons $v_{T/S}$ la vitesse du tapis par rapport au sol, $v_{P/T}$ la vitesse de Pascale par rapport au tapis et $v_{P/S}$ la vitesse de Pascale par rapport au sol.



12. Additivité des vitesses. Par rapport au sol, Pascale (P) a parcouru la distance AB : 3 unités correspondent à son mouvement par rapport au tapis et 4 unités au mouvement du tapis par rapport au sol pendant le même intervalle de temps.

On conçoit très bien (fig. 12) que la vitesse de Pascale par rapport au sol sera de :

$$3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} + 4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} = 7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}.$$

Nous avons donc :

$$v_{P/S} = v_{P/T} + v_{T/S}.$$

Cette relation est aussi vérifiée vectoriellement :

$$\vec{v}_{P/S} = \vec{v}_{P/T} + \vec{v}_{T/S}.$$



13. La grande roue est animée d'un mouvement de rotation autour de son axe, fixe. Les nacelles sont pratiquement animées d'un mouvement de translation circulaire.

Faire le point

- Qu'appelle-t-on trajectoire d'un point mobile?
- Une trajectoire dépend-elle du repère choisi?
- Qu'elle est l'unité de vitesse dans le système international d'unités?
- Définir le vecteur vitesse instantanée.

Vrai ou faux?

Quelles sont les bonnes réponses :

- Lorsque la norme d'un vecteur vitesse instantanée est constante, le mouvement :

1. est uniforme;
2. peut être rectiligne;
3. ne peut être que rectiligne et uniforme;
4. peut être curviligne.

- A la fête foraine, les balancelles de la grande roue sont animées d'un mouvement de rotation.
- $1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \approx 0,278 \text{ m/s}$.
- Le kilomètre-heure ($\text{km} \cdot \text{h}$) est une unité de vitesse.

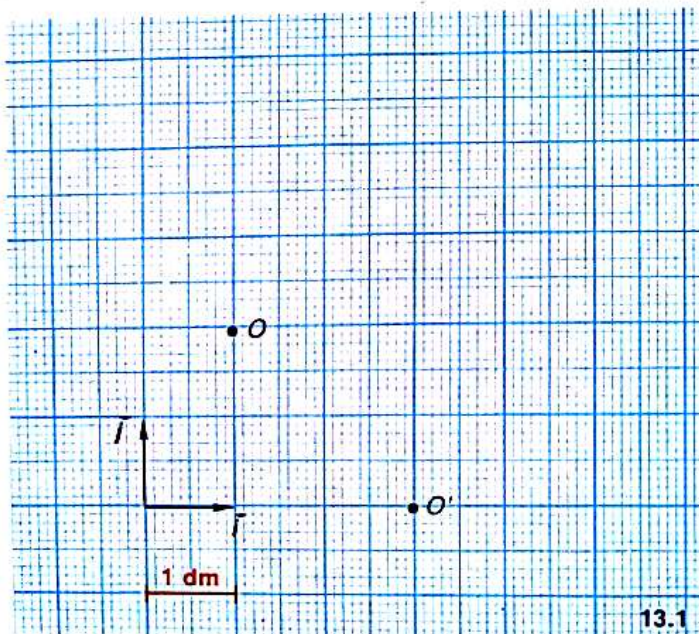
Vecteur position

13.1 On considère les deux repères $\mathcal{R}(O, \vec{i}, \vec{j})$ et $\mathcal{R}'(O', \vec{i}', \vec{j}')$.

1/ Dessiner un vecteur \vec{P} du plan tel que :

$$\vec{P} = 2\vec{i} + 3\vec{j}$$

2/ Situer un point M tel que : $\vec{OM} = \vec{P}$ et un point M' tel que : $\vec{O'M'} = \vec{P}$.

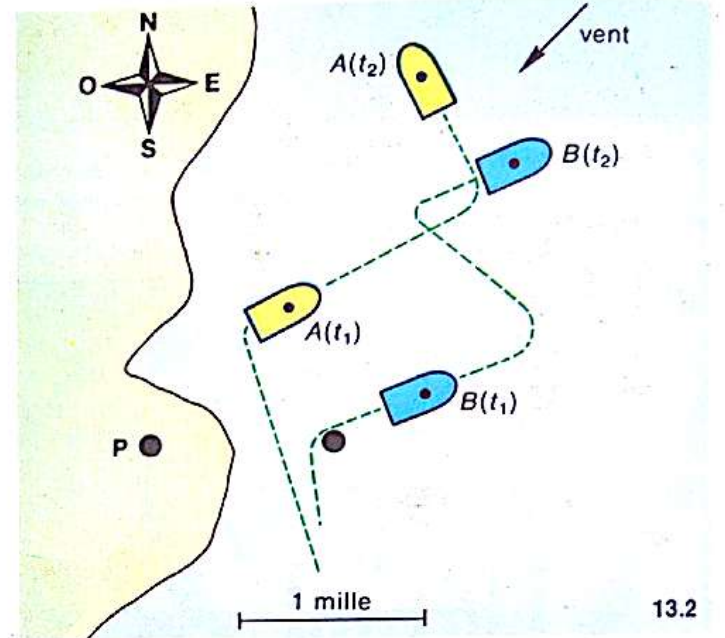


13.1

3/ On notera $\vec{P}_{M|\mathcal{R}'}$, $\vec{P}_{M|\mathcal{R}}$ et $\vec{P}_{O'|\mathcal{R}}$ respectivement les vecteurs position de M par rapport à \mathcal{R}' , de M par rapport à \mathcal{R} et de O' par rapport à \mathcal{R} . Tracer ces vecteurs. Quelle relation existe-t-il entre eux? Quelle est la mesure de la norme de chacun d'eux?

4/ Donner les coordonnées du point M , puis celles de M' dans les deux repères $\mathcal{R}(O, \vec{i}, \vec{j})$ et $\mathcal{R}'(O', \vec{i}', \vec{j}')$.

13.2 Sur la figure ci-dessous, nous avons représenté les positions occupées par deux voiliers à deux dates différentes t_1 et t_2 .



13.2

1/ A la date t_1 , le bateau A (repéré par son mât) est situé à 0,75 mille au nord et 0,75 mille à l'est du phare P, à 0,5 mille au nord et à 0,75 mille à l'ouest du bateau B. A partir de ces données, vous paraît-il possible de déduire la position du bateau B par rapport au phare P?

2/ Nous associons maintenant au solide de référence qu'est le phare, deux vecteurs unitaires \vec{i} et \vec{j} orthogonaux, de directions et de sens respectifs ouest-est et sud-nord. L'unité de longueur choisie est le mille. Représenter et exprimer en fonction des vecteurs unitaires et à l'instant t_1 :

- a/ le vecteur position \vec{P}_1 du bateau A par rapport au phare;
 - b/ le vecteur position \vec{P}_2 du bateau A par rapport au bateau B;
 - c/ en déduire le vecteur position \vec{P}_3 du bateau B par rapport au phare.
- 3/ Représenter aux instants t_1 et t_2 , et en prenant comme repère le bateau A, les vecteurs position du phare P et du bateau B.

Vitesse moyenne

13.3 Un automobiliste met 1 minute et 2 secondes pour traverser une agglomération longue de 1,2 km et où la vitesse est limitée à $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

- 1/ Cet automobiliste est-il en faute?
- 2/ Quelle durée aurait-il mis s'il avait roulé à $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$?

13.4 Calculer les vitesses moyennes (en $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ et en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) des différents mobiles indiqués dans le tableau ci-dessous :

mobile	distance parcourue	durée
escargot	14 mm	4 s
coureur de vitesse (sprinter)	100 m	9,9 s
automobile	400 m	18,19 s
T.G.V.	440 km	2 h 10 min

13.5 Lors d'une étude comparative, on détecte l'aptitude d'une automobile au dépassement selon le test suivant : la voiture roule à $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ en suivant un camion de 18 m de long qui circule à la même vitesse. La voiture déboîte et accélère aux maximum de ses possibilités; elle se rabat 25 m après avoir dépassé le camion. Lors des essais avec deux personnes à bord, on obtient les résultats suivants :

mobile	VW.Golf	Renault 11
durée	12,5 s	11,6 s
distance parcourue	350 m	330 m
vitesse en fin de dépassement	$119,3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$	$122,2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$

1/ Calculer la vitesse moyenne de dépassement de chaque automobile.

2/ Quelle est la distance parcourue par le camion durant le dépassement?

13.6 On a relevé au compteur d'une voiture la vitesse à partir d'un instant $t=0$:

t (s)	0	1	2	3	4	5
v ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	20	22,2	24,4	26,6	28,8	31

Représenter le graphique de v en fonction de t . Que constate-t-on? Peut-on trouver une relation simple entre v et t ? Trouver la valeur numérique de l'accroissement de vitesse par seconde; préciser l'unité.

13.7 Un train d'une longueur de 300 m traverse un viaduc de 220 m de long. Le temps qui s'écoule entre l'entrée de l'avant de la locomotive et la sortie de l'arrière du dernier wagon est de 13,4 s. Quelle est la vitesse du train en $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$?

13.8 Un train part de Paris à 11 h 56 min pour Rouen. Il roule à la vitesse moyenne de $120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. A 12 h

11 min, un autre train part de Rouen pour Paris en roulant à la vitesse moyenne de $70 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. La distance Paris-Rouen vaut 140 km.

1/ A quelle heure les trains arrivent-ils à destination?

2/ A quelle heure, et à quelle distance de Paris, la rencontre a-t-elle lieu?

13.9 La détermination la plus précise de la distance Terre-Lune est obtenue actuellement par la méthode de l'écho laser. Un laser envoie une impulsion qui se propage à la vitesse de $3\cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et se réfléchit sur un capteur placé sur la Lune. Cette impulsion est captée à son retour sur Terre. Des mesures, effectuées à différentes dates, ont donné pour durée entre l'émission et la réception des valeurs comprises entre 2376,66 ms et 2712,10 ms.

1/ Expliquer pourquoi cette durée dépend de la date où la mesure est faite.

2/ Entre quelles valeurs est comprise la distance Terre-Lune?

13.10 L'année de lumière (symbole : a.l.) est la distance parcourue par un rayon lumineux dans le vide pendant 1 an (365,242 jours). La vitesse de la lumière dans le vide est de $299\,792,2 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.

1/ Quelle est la mesure, en kilomètres, de l'année de lumière?

2/ Le parsec (symbole : pc) est une unité de longueur utilisée en astronomie : c'est la distance à laquelle le rayon moyen, égal à 150 millions de kilomètres, de l'orbite décrite par la Terre autour du Soleil, est vue sous un angle d'une seconde ($1''$). Montrer que :

$$1 \text{ parsec} = 3,09 \cdot 10^{13} \text{ km.}$$

3/ Quelle est la mesure, en parsecs, de l'année de lumière?

13.11 On admet que la Terre est une sphère de centre O et de rayon R . La longueur de la circonférence d'un « grand cercle » de centre O , de rayon R est $40\,000 \text{ km}$. Si un navire décrit un arc de grand cercle \widehat{AB} tel que l'angle \widehat{AOB} des rayons OA et OB soit égal à 1 minute d'angle, alors la longueur de l'arc \widehat{AB} est, par définition, égale à un mille marin.

1/ Exprimer le mille marin en km. Sachant que 1 nœud est la vitesse d'un navire qui parcourt 1 mille en 1 heure, calculer la valeur d'un nœud en $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$.

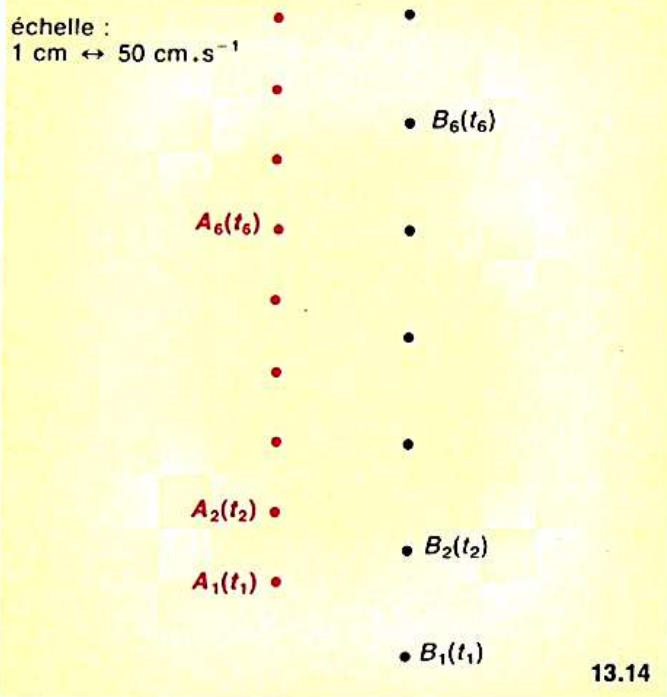
2/ Pour mesurer la vitesse d'un navire, on laisse filer une corde sur laquelle des nœuds ont été réalisés tous les 7,72 m. La partie de la corde qui flotte est immobile par rapport à l'eau. Sachant qu'un nœud « file » toutes les 15 s, quelle est la vitesse du navire en nœuds?

13.12 Un plateau de tourne-disque tourne à raison de 33 tours $1/3$ par minute. Calculer la vitesse en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ d'un point du disque situé à 15 cm du centre.

13.13 Un satellite géostationnaire, situé dans le plan de l'équateur, paraît immobile dans le ciel pour un observateur terrestre. Par rapport à un repère d'espace défini par le centre de la Terre et trois axes ayant des directions fixes données par trois étoiles (repère géocentrique), la Terre fait un tour sur elle-même en 86 164 s. Calculer par rapport à ce repère la vitesse d'un point de la Terre situé sur l'équateur et la vitesse du satellite situé à l'altitude de 35 700 km. Le rayon moyen de la Terre est égal à 6 400 km.

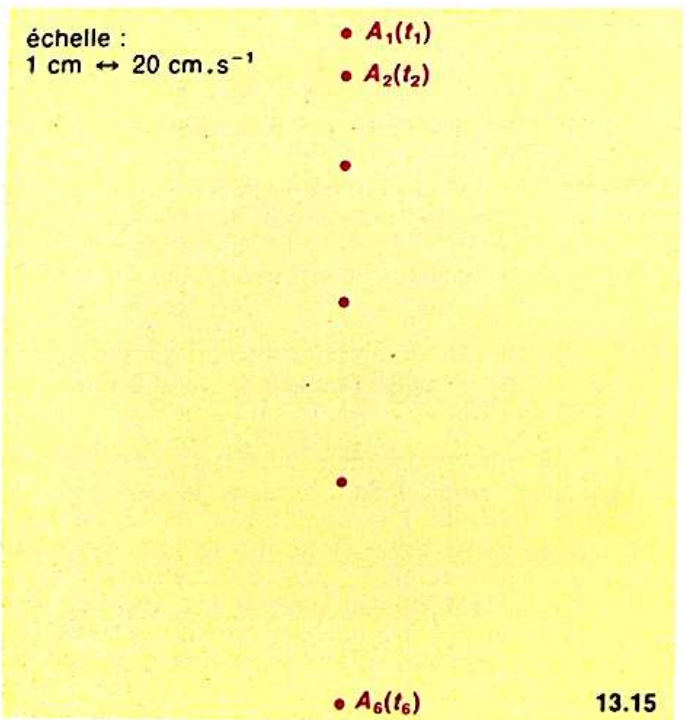
Vecteurs vitesse

13.14 1/ Déduire des tracés ci-après la nature des mouvements du point A (A coïncide aux dates t_i avec les points A_i) et du point B (points B_i , dates t_i). La durée entre deux inscriptions est constante et vaut $\tau = 1/50$ s.



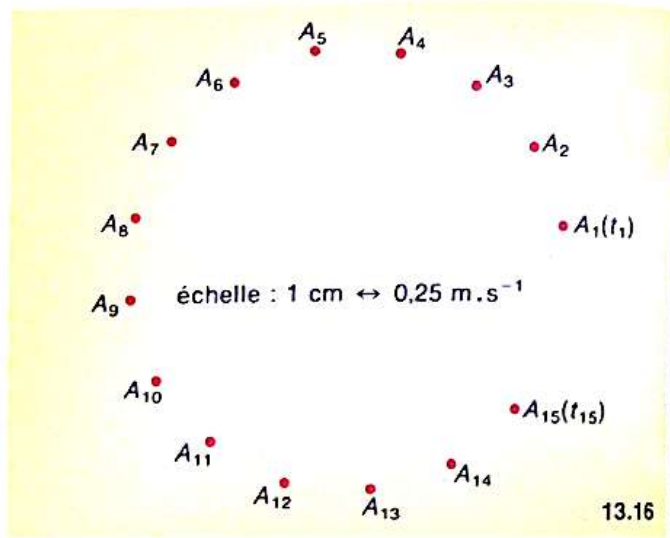
- 2/ Tracer les vecteurs vitesse instantanée de A aux dates t_2, t_4, t_6 . conclure.
- 3/ Tracer les vecteurs vitesse instantanée de B aux mêmes dates.
- 4/ Comparer les vecteurs vitesse instantanée de A et de B.

13.15 Sur une table à coussin d'air on a relevé la trajectoire donnée ci-après d'un point A d'un palet, avec $\tau = 1/20$ s.



- 1/ Que peut-on dire du mouvement d'un tel point?
- 2/ Calculer la vitesse moyenne de A entre t_1 et t_3, t_1 et t_5, t_1 et t_6 .
- 3/ tracer les vecteurs vitesse instantanée de A aux dates t_2 et t_5 . On donnera la valeur de la vitesse instantanée à chacune de ces dates.

13.16 On considère la figure ci-dessous; elle donne les positions successives d'un point A à différentes dates t_i , espacées d'une même durée $\tau = 0,02$ s.



- 1/ Quelle est la nature du mouvement de A?
- 2/ Tracer les vecteurs vitesse aux dates t_2, t_4, t_8 et t_{10} que l'on notera :

$$\vec{v}_A(t_2); \vec{v}_A(t_4); \vec{v}_A(t_8); \vec{v}_A(t_{10}).$$

- 3/ Tracer les vecteurs variation de vitesse :

$$\overline{\Delta v}_A(t_3) = \vec{v}_A(t_4) - \vec{v}_A(t_2)$$

en A_3 (position intermédiaire de A entre les dates t_2 et t_4);

$$\overline{\Delta v}_A(t_9) = \vec{v}_A(t_{10}) - \vec{v}_A(t_8)$$

en A_9 (position intermédiaire entre les dates t_8 et t_{10}).

- 4/ Par quel point particulier passent les droites supports de ces vecteurs?

13.17 Sylvie écoute son chanteur préféré. Le disque est un 45 tours et a 17 cm de diamètre. Quelle est la vitesse, par rapport au châssis du tourne-disque, d'un point de la périphérie du disque? Représenter le vecteur vitesse de ce point à l'échelle suivante :

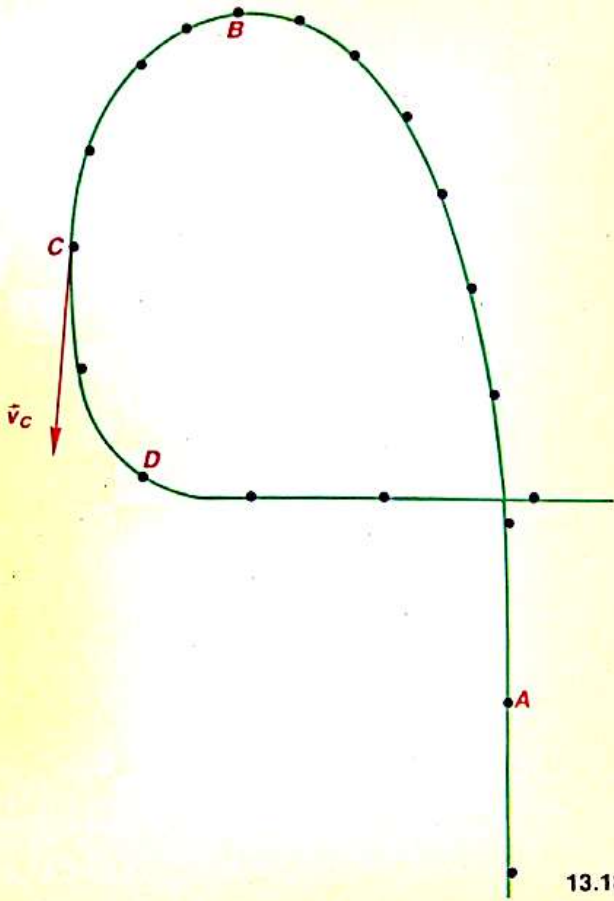
$$1 \text{ cm} \leftrightarrow 20 \text{ cm.s}^{-1}.$$

13.18 Voici ci-après la copie d'un enregistrement réalisé avec un mobile sur table à coussin d'air. Le marquage est réalisé à intervalles de temps réguliers, toutes les 20 ms.

- 1/ Comment a-t-on procédé pour calculer et tracer le vecteur vitesse instantanée du mobile au point C de la trajectoire? Quelle est l'échelle de représentation?

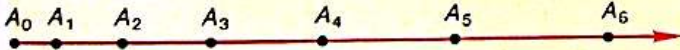
- 2/ On peut découper la trajectoire en trois parties. Caractériser le mouvement sur chaque partie de la trajectoire.

- 3/ Déterminer les vecteurs vitesse instantanée aux points B et A de la trajectoire. La méthode utilisée habituellement pour déterminer la vitesse instantanée vous paraît-elle convenir pour le point D?



13.18

13.19 On a reproduit ci-après la trajectoire d'un mobile sur table à coussin d'air.



13.19

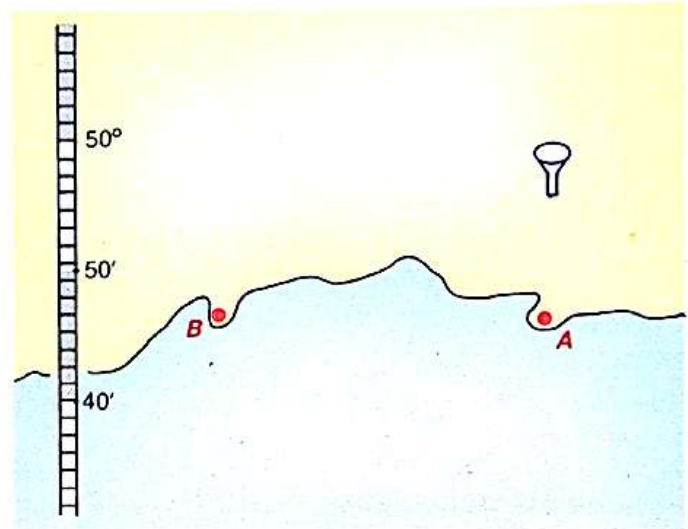
- 1/ Caractériser le mouvement de ce mobile.
- 2/ Déterminer les vecteurs vitesse instantanée et leur norme aux points A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 . Le marquage est réalisé toutes les 40 ms.
- 3/ On prend comme origine des dates l'instant de passage en A_6 . Dans un système d'axes rectangulaires, avec la norme du vecteur vitesse en ordonnée et le temps t en abscisse, placer les couples (v_{A_i}, t_i) . Comment sont placés tous les points obtenus?
- 4/ Un tel mouvement est appelé un mouvement rectiligne uniformément varié. A l'aide de la question 3, donner une définition de ce type de mouvement. Comment pourrait-on reconnaître facilement qu'un mouvement d'un mobile sur une trajectoire est de ce type?

Mouvement relatif

13.20 Un canot descend un fleuve. Sa vitesse par rapport à l'eau est égale à $30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Le courant d'eau a une vitesse constante de $5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. A un certain moment une bouée tombe du canot. Le navigateur s'en aperçoit $1/2 \text{ h}$ plus tard et fait demi-tour. Sachant qu'au retour le moteur fonctionne au même régime qu'à l'aller, quelle distance aura parcouru la bouée au fil de l'eau lorsque le navigateur la rattrapera?

Faire le point en mer

Les angles sont comptés à partir du Nord géographique et dans le sens des aiguilles d'une montre. Les exercices qui suivent se rapportent à la figure ci-dessous.



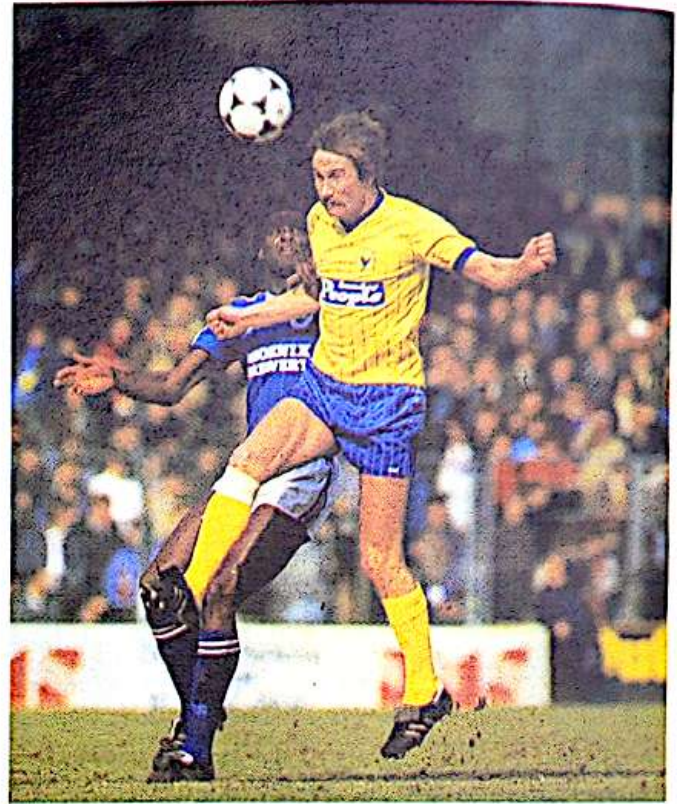
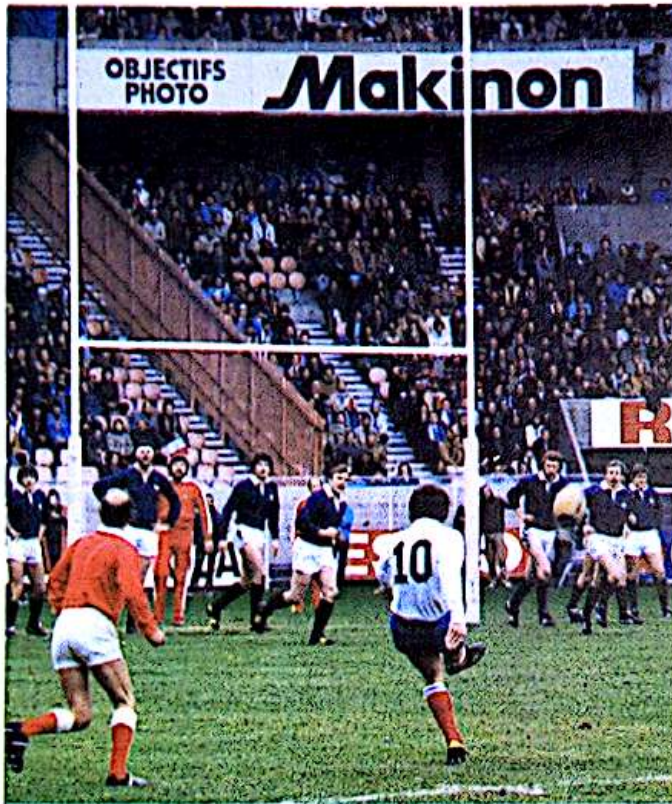
13.21 Un navigateur relève un phare A à 30° et un phare B à 290° . Donner graphiquement sa position.

13.22 Un navigateur fait le point : il se trouve dans l'alignement du phare A et du château d'eau; il relève le phare B à 10° . Représenter graphiquement sa position.

13.23 Le cap d'un navire est à 98° . La vitesse est évaluée à 8 nœuds. Sur la figure est représentée l'échelle des latitudes dans la zone où se trouve le navire. Représenter graphiquement les positions du navire à deux instants séparés de $1 \text{ h } 30$, sachant que 1 mille correspond, sur l'échelle des latitudes, à 1 minute d'angle ($1'$).

13.24 La route d'un navire fait un angle de 50° avec le Nord géographique (cap vrai). Sa vitesse par rapport à la mer est égale à 12 nœuds. Sur la carte est indiqué un courant de 2 nœuds vers le S.O., à 230° . Quelle est la vitesse du navire par rapport à la côte? Avec l'échelle des latitudes indiquée, quelle distance sur la carte parcourt-il en 2 h?

Actions mécaniques



A gauche, transformation d'un essai : le ballon est mis en mouvement par l'action mécanique du pied du joueur.
A droite, but marqué de la tête : le mouvement du ballon est modifié par l'action mécanique de la tête du joueur.

14.1 manifestations d'une action mécanique

14.1.1 mise en mouvement d'un objet

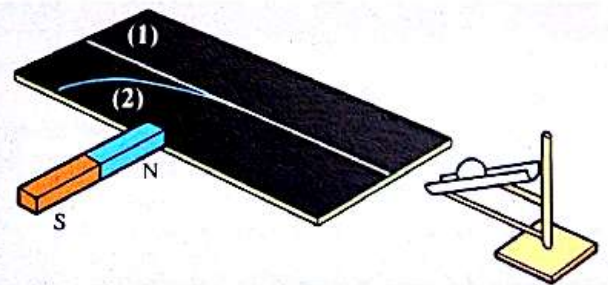
Lorsque nous jouons au flipper, nous mettons la bille en jeu à l'aide d'un lanceur actionné par un ressort. Le lanceur exerce une action mécanique sur la bille et la propulse.

Sur la photo ci-dessus, à gauche, c'est l'action mécanique exercée par le pied du joueur sur le ballon qui a permis la transformation de l'essai.

- Une action mécanique peut mettre en mouvement un objet.

14.1.2 modification du mouvement

A l'aide d'une glissière inclinée, lançons une bille d'acier recouverte de talc, sur une planche horizontale recouverte de papier noir : la bille marque en blanc sa trajectoire(*) rectiligne sur le papier noir (fig. 1, trajectoire [1]).



1. La présence de l'aimant modifie la trajectoire de la bille métallique.

(*) En toute rigueur, il s'agit d'une trajectoire parallèle à celle du centre de la bille.

Disposons un aimant comme l'indique la figure et recommençons l'expérience : la trajectoire de la bille est modifiée par l'action à distance exercée par l'aimant (trajectoire [2]).

Lorsque, sur une passe, un footballeur marque un but de la tête, l'action mécanique exercée par sa tête a modifié la trajectoire du ballon...

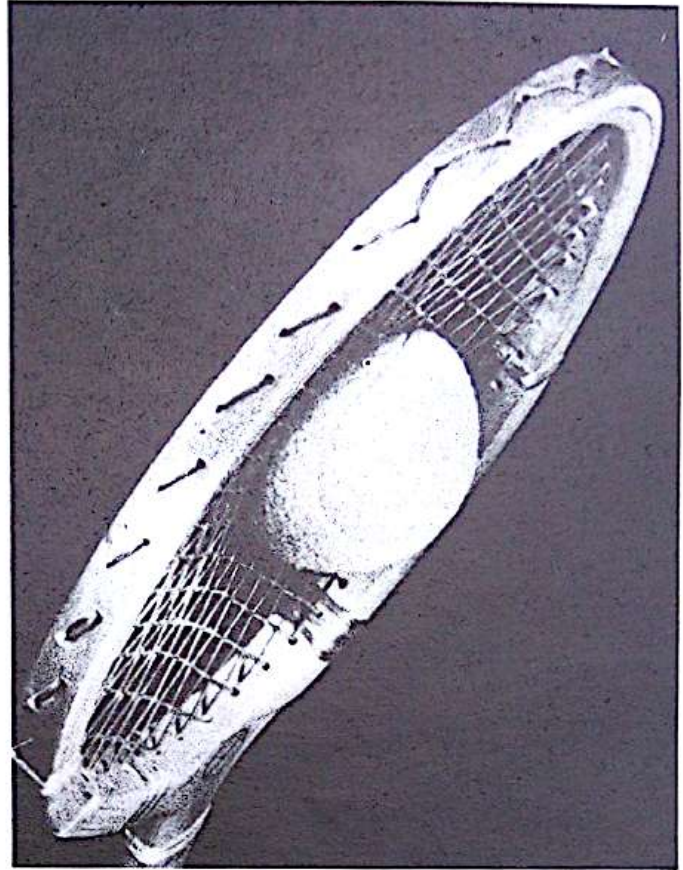
- Une action mécanique peut modifier le mouvement d'un objet.

14.1.3 déformation

En agissant sur un arc, l'archer déforme le bois de l'arc et la corde. (Remarquons que l'arc est déformé par deux actions : l'une exercée par la main gauche de l'archer, l'autre exercée par sa main droite.)

Un coup de raquette violent déforme une balle de tennis.

- Une action mécanique peut déformer un objet.



2. Déformation d'une balle de tennis sous l'effet d'un fort coup de raquette. ▶

14.2 modélisation d'une action mécanique

14.2.1 notion de force

La déformation d'un extenseur étiré par un athlète dépend de la force exercée par ce dernier sur l'extenseur.

Plus généralement, nous dirons que les effets d'une action mécanique exercée par un corps A sur un corps B ($A \rightarrow B$) sont dus à la force exercée par A sur B notée $F_{A \rightarrow B}$.

14.2.2 caractéristiques d'une force

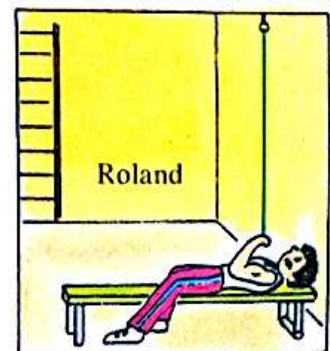
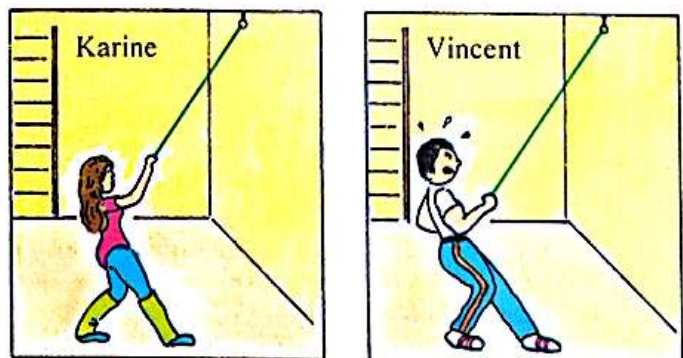
Karine, Vincent et Roland tirent successivement sur le même sandow (fig. 3).

Karine et Vincent tirent dans la même direction et le même sens. Mais Vincent, qui tire plus fort, provoque un allongement plus important.

Vincent et Roland provoquent le même allongement : ils tirent aussi fort l'un que l'autre mais pas dans la même direction.

Chacune des forces exercées possède une direction, un sens et une intensité, liés à la direction prise par le sandow, au sens et à l'amplitude de la déformation provoquée.

- Direction, sens et intensité sont trois caractéristiques d'une force.



3. La force exercée sur le sandow peut varier en direction, sens et intensité.

14.2.3 mesure de l'intensité d'une force

Un dynamomètre (fig. 4) contient un ressort que l'on peut étirer en exerçant une force sur chacune de ses extrémités. A chaque valeur de l'intensité des forces exercées correspond un allongement du ressort et une position de l'index mobile sur une échelle graduée en newtons (symbole : N); au nombre lu sur l'échelle correspond la mesure de l'intensité de la force.

Un dynamomètre permet donc de mesurer l'intensité d'une force.

- Une force se mesure en newtons.

Donnons ci-dessous l'intensité de quelques forces :

élastique tendu	1 N
homme soulevant un sac de ciment	500 N
cheval en plein travail	4 000 N
locomotive tractant un convoi	70 000 N
réacteur d'avion	100 000 N
réacteur de fusée	5 000 000 N

14.2.4 le vecteur force

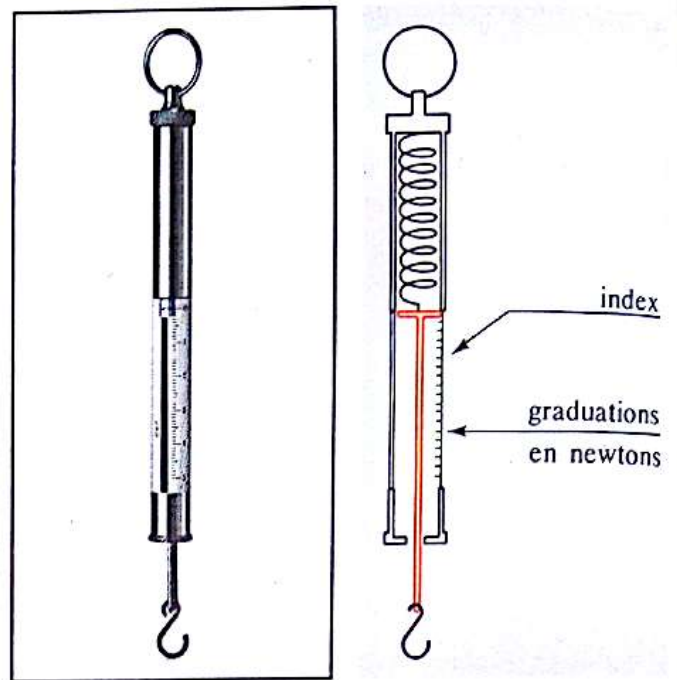
La force exercée par Karine (K) sur le sandow (S) possède une direction, un sens et une intensité. Cette force peut donc être représentée par un vecteur noté $\vec{F}_{K \rightarrow S}$ (fig. 5).

- Le vecteur force $\vec{F}_{K \rightarrow S}$ indique la direction et le sens de l'action mécanique exercée par K sur S.

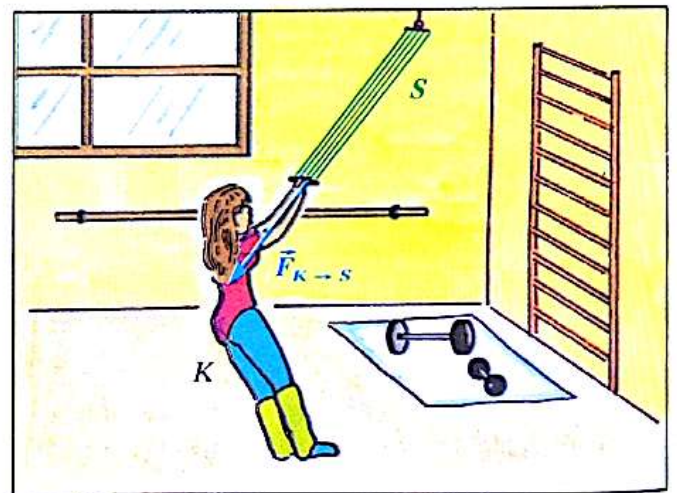
La norme de ce vecteur est égale à l'intensité de la force : $\|\vec{F}_{K \rightarrow S}\| = F_{K \rightarrow S}$, mesurée en newtons.

Par ailleurs, Karine exerce son action en un point précis : l'extrémité du sandow. La force $\vec{F}_{K \rightarrow S}$ est dite localisée : son point d'application est l'extrémité du sandow.

La représentation du vecteur force dépend bien évidemment de l'échelle adoptée (fig. 5).



4. Dynamomètre de lycée.



5. Représentation d'une force par un vecteur.

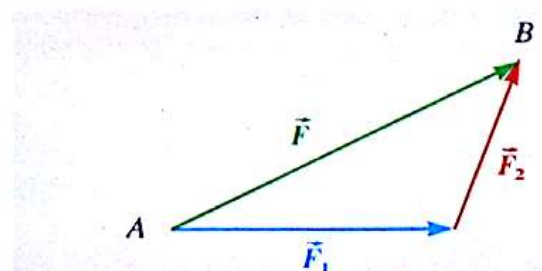
échelle 100 N \leftrightarrow 1 cm
 $F_{K \rightarrow S} = 150 \text{ N} \leftrightarrow 1,5 \text{ cm}$

14.3 somme de plusieurs forces

La force étant une grandeur vectorielle, il est donc possible de déterminer la somme \vec{F} des forces $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3, \dots$ exercées simultanément sur un même objet.

Cette somme est une somme de vecteurs. La figure 6 rappelle la règle, étudiée en mathématiques, qui permet de faire une somme de deux vecteurs. A partir de l'extrémité de \vec{F}_1 , nous portons \vec{F}_2 ; \vec{F} est obtenue en joignant l'origine de \vec{F}_1 (point A) à l'extrémité de \vec{F}_2 (point B).

Remarque : Les forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 ayant en général une localisation différente, cela n'a pas de sens, généralement, d'attribuer une localisation à la somme \vec{F} . Toutefois, la notion de somme de forces est fondamentale pour étudier le mouvement ou l'équilibre d'un corps (chapitre 20).



6. Somme $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$ de deux forces.

Application 1 :

A l'extrémité libre d'un ressort sont appliquées successivement différentes forces. Soit F l'intensité d'une de ces forces et x l'allongement correspondant du ressort. Des mesures donnent les résultats suivants :

$F(\text{N})$	0	5	11	15	18	20
$x(\text{m})$	0	0,1	0,22	0,3	0,36	0,4

1/ Représenter graphiquement l'application :

$$x \mapsto F(x).$$

2/ Montrer que l'on peut écrire :

$$F = k \cdot x.$$

k est appelé raideur du ressort et s'exprime en newtons par mètre ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$). Quelle est sa valeur?

1/ Le graphique est tracé ci-contre.

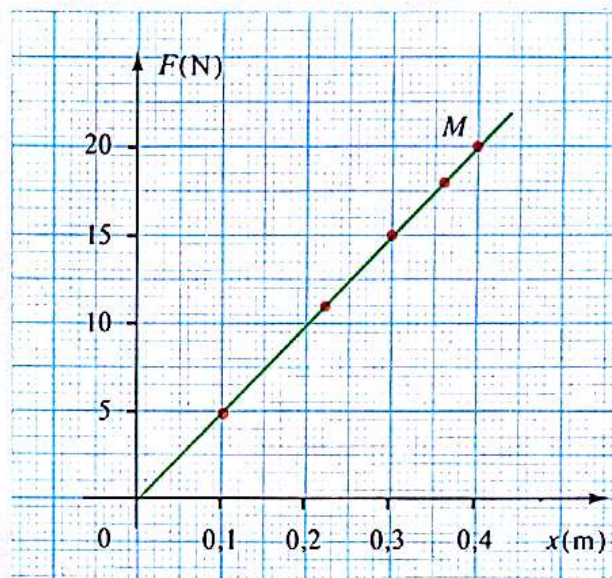
2/ Les points du graphique étant alignés entre eux et avec l'origine, F est une fonction linéaire de x . Si nous appelons k la pente de la droite, nous avons :

$$F = k \cdot x.$$

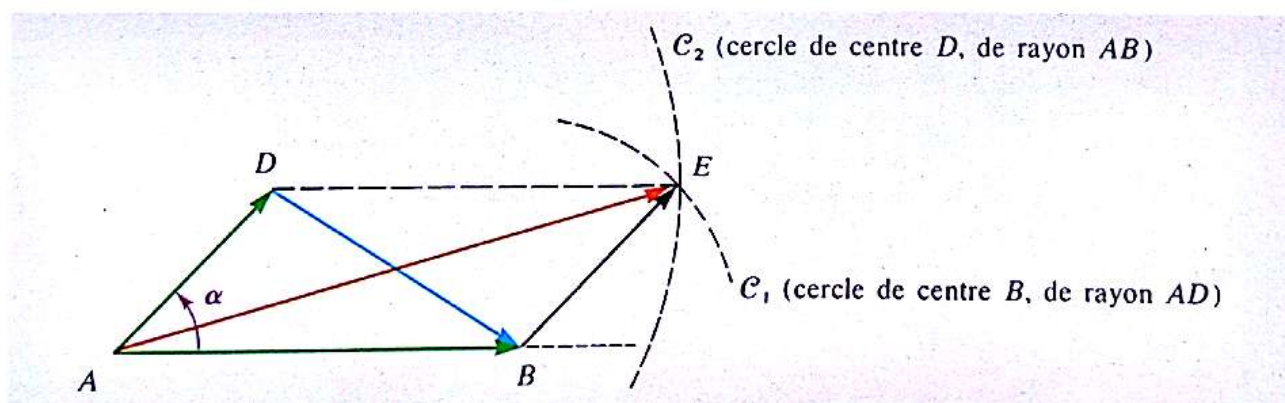
Déterminons la raideur k du ressort. Pour cela, utilisons, par exemple, le point M :

$$k = \frac{F(M)}{x(M)} = \frac{20}{0,4}$$

$$k = 50 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}.$$

**Compléments mathématiques**

somme et différence de deux vecteurs



• Le vecteur \overrightarrow{AE} , associé à la diagonale du parallélogramme construit à partir de deux vecteurs \overrightarrow{AB} et \overrightarrow{AD} , est la somme de ces deux vecteurs. En effet :

$$\overrightarrow{AD} = \overrightarrow{BE}$$

$$\overrightarrow{AB} + \overrightarrow{AD} = \overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BE} = \overrightarrow{AE}$$

(règle de Chasles)

• Le vecteur \overrightarrow{DB} , associé à l'autre diagonale, est la différence de ces deux vecteurs. En effet :

$$\overrightarrow{AB} - \overrightarrow{AD} = \overrightarrow{DA} + \overrightarrow{AB} = \overrightarrow{DB}.$$

• Considérons maintenant l'égalité :

$$\overrightarrow{AE} = \overrightarrow{AB} + \overrightarrow{AD}$$

et élevons au carré chacun de ses membres

$$(\overrightarrow{AE})^2 = (\overrightarrow{AB})^2 + (\overrightarrow{AD})^2 + 2\overrightarrow{AB} \cdot \overrightarrow{AD},$$

avec

$$\overrightarrow{AB} \cdot \overrightarrow{AD} = AB \times AD \times \cos(\widehat{AB, AD})$$

(produit scalaire)

d'où

$$AE^2 = AB^2 + AD^2 + 2AB \times AD \times \cos \alpha.$$

Application 2 :

Soit une force \vec{F}_1 d'intensité 2 N. Donner les caractéristiques de la force $\vec{F}_2 = 3\vec{F}_1$.

\vec{F}_2 a même direction et même sens que \vec{F}_1 .
Son intensité est égale à :

$$F_2 = 3F_1 = 3 \times 2 = 6 \text{ N.}$$

Application 3 :

Sur un solide sont appliquées :

— une force \vec{F}_1 verticale, dirigée vers le bas, d'intensité 3 N;

— une force \vec{F}_2 horizontale, d'intensité 4 N.

Caractériser la somme $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$.

• Méthode graphique

Représentons \vec{F}_1 et \vec{F}_2 à l'échelle 1 cm \leftrightarrow 1 N. \vec{F}_1 est schématisée par une flèche de 3 cm de longueur et \vec{F}_2 par une flèche de 4 cm de longueur. Sur le schéma, nous constatons alors que \vec{F} est représentée par une flèche de 5 cm de longueur : l'intensité de \vec{F} vaut donc 5 N.

Avec un rapporteur, mesurons enfin l'angle α que font entre elles \vec{F} et \vec{F}_1 : nous trouvons $\alpha = 53^\circ$.

• Méthode géométrique

\vec{F} correspond à la diagonale du rectangle formé à partir de \vec{F}_1 et \vec{F}_2 .

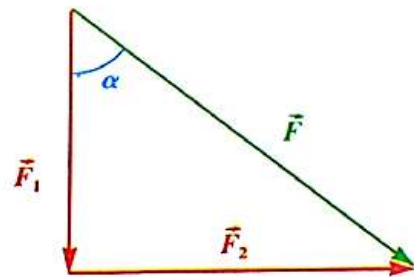
Le théorème de Pythagore donne :

$$F^2 = F_1^2 + F_2^2$$

$$F = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ N}$$

$$\text{Enfin } \tan \alpha = \frac{F_2}{F_1} = \frac{4}{3} \implies \alpha = 53^\circ.$$

Nous avons ainsi caractérisé \vec{F} (direction, sens et intensité).

**Application 4 :**

Soit un repère orthonormé (O, \vec{i}, \vec{j}) et deux forces données (avec pour unité le newton) par :

$$\vec{F}_1 = 3\vec{i} + 4\vec{j}, \quad \vec{F}_2 = \vec{i} - 2\vec{j}.$$

1/ Déterminer les normes F_1 et F_2 des forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 .

2/ Caractériser $\vec{F} = \vec{F}_1 - \vec{F}_2$.

$$1/ F_1 = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ N.}$$

$$F_2 = \sqrt{1^2 + 2^2} = 2,24 \text{ N.}$$

$$2/ \vec{F} = (3\vec{i} + 4\vec{j}) - (\vec{i} - 2\vec{j})$$

$$\vec{F} = 2\vec{i} + 6\vec{j}$$

$$F = \sqrt{2^2 + 6^2} = 6,32 \text{ N.}$$

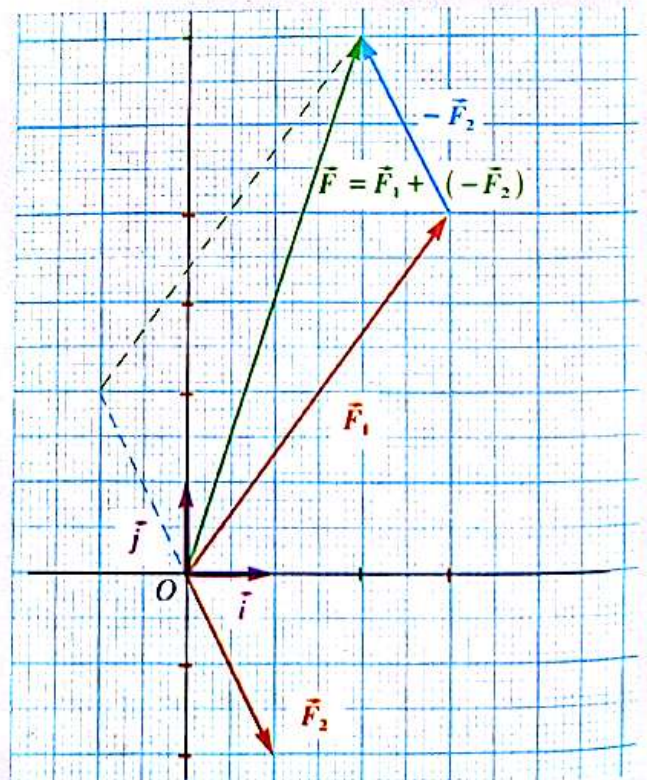
Cette force fait avec \vec{i} l'angle α donné par :

$$\tan \alpha = \frac{6}{2} = 3 \implies \alpha \approx 72^\circ.$$

L'utilisation directe de la figure ci-contre donne une solution graphique. La somme :

$$\vec{F}_1 + (-\vec{F}_2) = \vec{F}_1 - \vec{F}_2$$

est effectuée par la règle du parallélogramme.



Application 5 :

Un solide est soumis à deux forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 .
 La force \vec{F}_1 , d'intensité 50 N, fait, vers le haut, l'angle $\alpha = 30^\circ$ avec l'horizontale.
 La force \vec{F}_2 , d'intensité 40 N, fait, vers le bas, l'angle $\beta = 20^\circ$ avec la même horizontale.
 Déterminer $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$.

Soit un repère orthonormé (O, \vec{i}, \vec{j}) , dont l'axe Ox est horizontal et l'axe Oy vertical, dirigé vers le haut.

$$\vec{F}_1 \begin{cases} F_{1x} = F_1 \cdot \cos \alpha = 50 \cdot \cos 30^\circ = 43,3 \text{ N} \\ F_{1y} = F_1 \cdot \sin \alpha = 50 \cdot \sin 30^\circ = 25 \text{ N} \end{cases}$$

$$\vec{F}_2 \begin{cases} F_{2x} = F_2 \cdot \cos \beta = 37,6 \text{ N} \\ F_{2y} = -F_2 \cdot \sin \beta = -13,7 \text{ N} \end{cases}$$

Donc :

$$\vec{F} \begin{cases} F_x = F_{1x} + F_{2x} = 80,9 \text{ N} \\ F_y = F_{1y} + F_{2y} = 11,3 \text{ N} \end{cases}$$

Cette force \vec{F} a une intensité de

$$\sqrt{80,9^2 + 11,3^2} = 81,7 \text{ N}$$

et fait avec Ox l'angle γ donné par :

$$\tan \gamma = \frac{F_y}{F_x} = 0,14 \implies \gamma = 8^\circ.$$

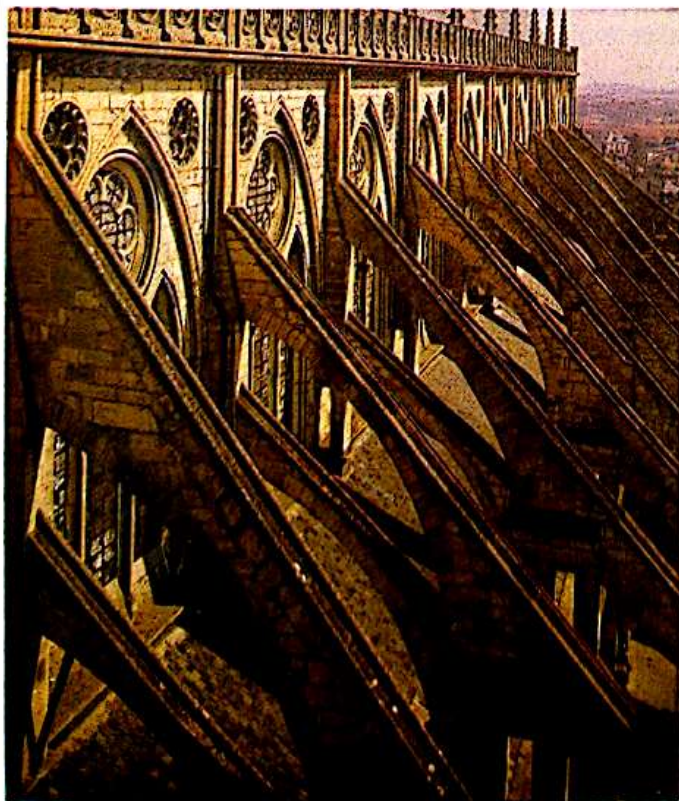
DOCUMENT**L'arc-boutant**

Pour remplacer les murs de soutènement des églises romanes, massives, et pour alléger leur structure, l'arc-boutant fut inventé par les architectes du XII^e siècle et appliqué à la construction des églises gothiques.

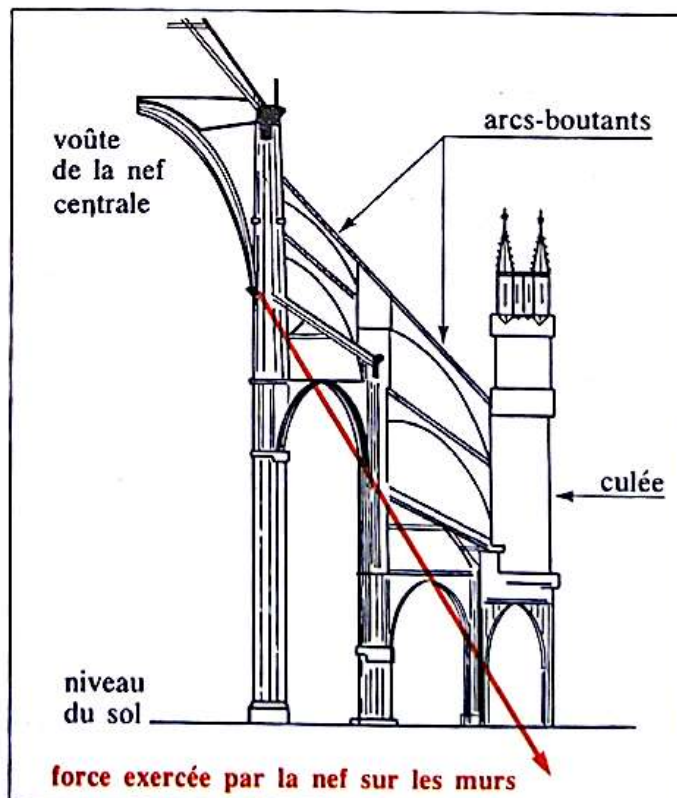
L'arc-boutant est un arc extérieur qui retient les murs de l'édifice en s'appuyant sur un pilier de maçonnerie appelé *culée*.

Pour contrebalancer l'énorme poussée de la nef d'une cathédrale gothique, il fallut des culées imposantes et en grand nombre.

L'arc-boutant fut utilisé pour la première fois systématiquement dans la construction de la cathédrale de Notre-Dame de Paris dès 1162.



L'arc-boutant a fait place aux courbes audacieuses et à la technique du béton précontraint.



Faire le point

- Quels sont les effets d'une force exercée sur un corps?
- Qu'est-ce qu'un dynamomètre?
- Quelle est l'unité de force?
- Si $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$, peut-on toujours écrire :

$$\|\vec{F}\| = \|\vec{F}_1\| + \|\vec{F}_2\|?$$

14.1 Trouver l'origine de la modification du mouvement :

- a/ d'une balle qui rebondit sur le sol;
- b/ d'un parachute qui ne tombe pas verticalement;
- c/ d'une automobile, moteur débrayé, qui s'arrête sur une route horizontale;
- d/ d'une fusée qui décolle;
- d/ d'une boule de billard.

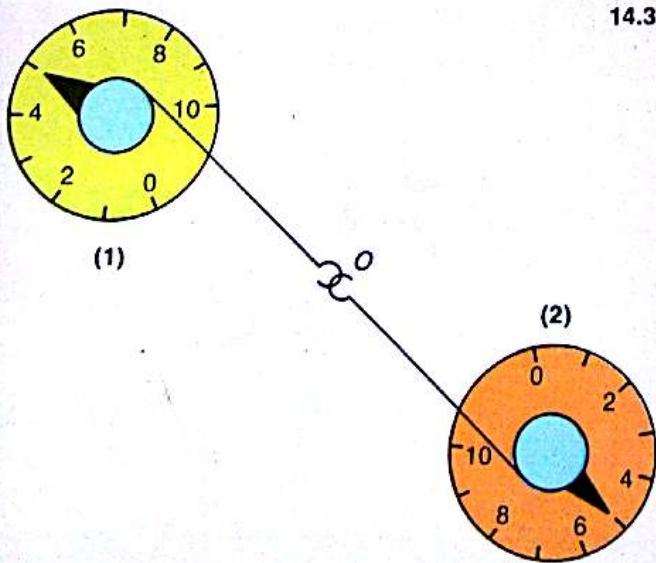
14.2 Trouver l'origine de la déformation :

- a/ de la voile d'un bateau;
- b/ d'un ballon que l'on gonfle;
- c/ de la corde d'un arc;
- d/ d'un pneu dans un virage.

Dynamomètre

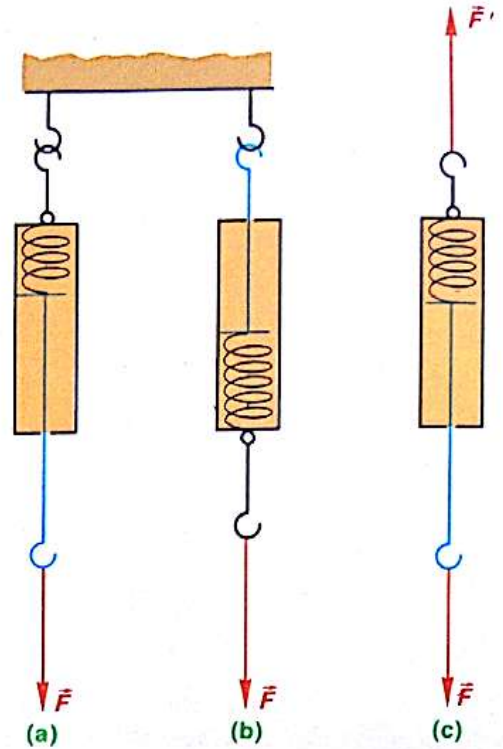
14.3 On réalise l'expérience suivante; on accroche deux dynamomètres que l'on maintient sous tension.

- 1/ Représenter la force exercée en O par le dynamomètre (1) sur le dynamomètre (2) : $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$.
- 2/ Représenter la force exercée en O par le dynamomètre (2) sur le dynamomètre (1).
- 3/ Quelle est la particularité de ces deux forces?



14.3

14.4 On a réalisé les trois expériences a, b et c schématisées sur la figure ci-après. Dans l'expérience a le dynamomètre soumis à la force \vec{F} indique 8 N.



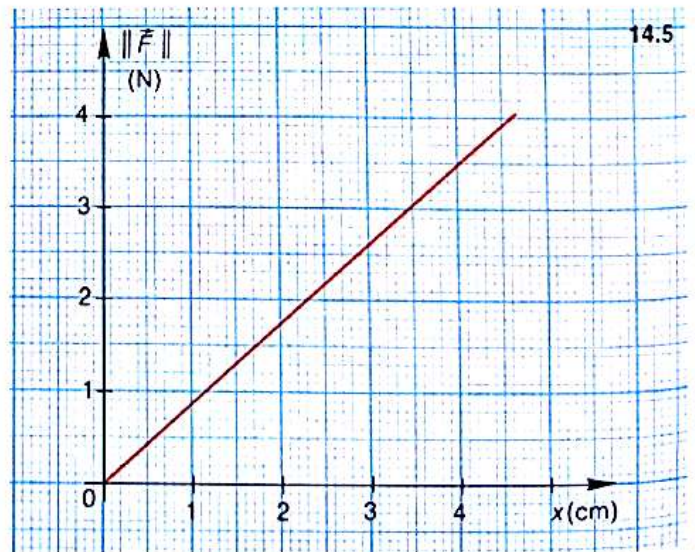
14.4

1/ Qu'indique le dynamomètre soumis à la même force \vec{F} dans l'expérience b?

2/ On exerce aux deux extrémités du dynamomètre la force \vec{F} précédente et la force \vec{F}' telle que $\vec{F}' = -\vec{F}$. Qu'indique le dynamomètre?

14.5 Le graphique ci-après représente l'allongement x du ressort d'un dynamomètre en fonction de l'intensité de la force exercée à l'une de ses extrémités, l'autre étant reliée à un point fixe.

- 1/ Quelle est la raideur k de ce ressort?
- 2/ Quelle est l'intensité de la force qui produit un allongement de 2 cm?



14.5

14.6 Quelle est l'intensité de la force appliquée à l'une des extrémités d'un ressort de raideur $k = 50 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, s'il s'allonge de 10 cm, l'autre extrémité étant solidaire d'un point fixe?

14.7 Sur un ressort de raideur $k = 10 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$, on exerce respectivement à chacune de ses extrémités des forces opposées \vec{F} et \vec{F}' telles que $\vec{F} = -\vec{F}'$. Quel est l'allongement du ressort si l'intensité de ces forces est de 1 newton?

14.8 Un ressort s'allonge de 0,8 cm sous l'action de deux forces opposées d'intensité 10 N.

1/ Quelle est la raideur k de ce ressort?

2/ Quelle est l'intensité des forces qui provoquent un allongement de 2,2 cm?

14.9 Un dynamomètre est accroché à l'une des extrémités d'un fil; l'autre extrémité est reliée à un point fixe; le dynamomètre indique 3 N; la direction du fil tendu rectiligne fait un angle de 60° avec la verticale. Schématiser la situation et représenter, à l'échelle $1 \text{ cm} \leftrightarrow 1 \text{ N}$, la force exercée par le dynamomètre sur le fil.

14.10 On accroche un dynamomètre à l'une des extrémités d'un ressort, l'autre extrémité étant fixe. L'action du dynamomètre sur le ressort provoque l'allongement de ce dernier. Pour différentes valeurs de l'intensité de la force exercée par le dynamomètre, on mesure la longueur ℓ du ressort :

$F \text{ (N)}$	3	5	8	10
$\ell \text{ (cm)}$	11,2	12	13,2	14

Représenter sur papier millimétré ces différents couples de mesures (F, ℓ) avec F en ordonnée et ℓ en abscisse. Déterminer la relation qui relie F à ℓ , la longueur ℓ_0 « à vide » du ressort et la constante de raideur k du ressort.

Caractéristiques des forces

14.11 Une bille est suspendue à l'aide d'un fil; elle est soumise à son poids \vec{P} , à la tension du fil \vec{T} et à une force tels que :

$$\|\vec{P}\| = \|\vec{T}\| = 20 \text{ N} \quad \text{et} \quad \vec{P} + \vec{T} + \vec{F} = \vec{0}.$$

Sachant que le fil fait un angle de 30° avec la verticale, faire un schéma et déterminer graphiquement la force \vec{F} .

14.12 On exerce sur un solide des forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 orthogonales dont les droites d'action se coupent en un point B . Déterminer graphiquement, puis par le calcul, la force $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$. Application numérique :

$$\|\vec{F}_1\| = 10 \text{ N} = 2 \|\vec{F}_2\|.$$

Quel est l'angle que fait la direction de \vec{F} avec celle de \vec{F}_1 ?

14.13 Une force \vec{F} d'intensité 4 N a une direction verticale et est dirigée vers le bas. Déterminer graphiquement les vecteurs forces suivants :

$$\vec{F}_1 = 2\vec{F}; \quad \vec{F}_2 = -3\vec{F}; \quad \vec{F}_3 = \vec{F}_1 - 2\vec{F}_2.$$

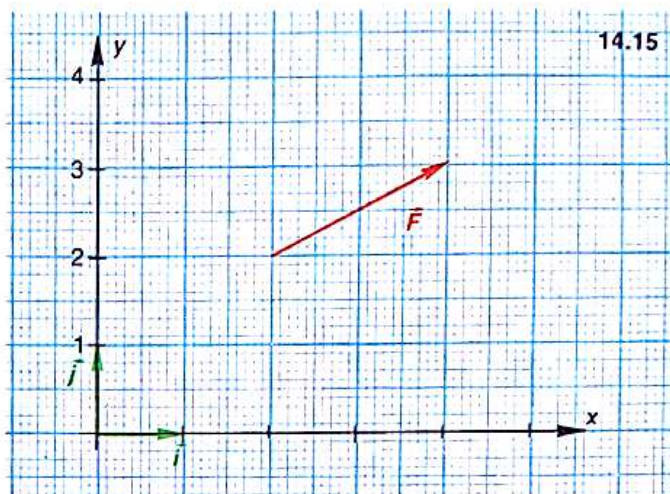
14.14 Trois forces coplanaires \vec{F}_1 , \vec{F}_2 et \vec{F}_3 , de même intensité égale à 40 N, forment entre elles les angles :

$$(\vec{F}_1, \vec{F}_2) = (\vec{F}_2, \vec{F}_3) = 60^\circ.$$

Déterminer :

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 \quad \text{et} \quad \vec{F}' = \vec{F}_1 - \vec{F}_2 + \vec{F}_3.$$

14.15 Dans un repère (O, \vec{i}, \vec{j}) , on a représenté un vecteur force \vec{F} ; l'unité de force est le newton.



1/ On peut écrire : $\vec{F} = F_x \cdot \vec{i} + F_y \cdot \vec{j}$. Déterminer F_x et F_y .

2/ Nous voulons calculer l'intensité de la force F en newtons et l'angle que fait \vec{F} avec \vec{i} , soit $\alpha = (\vec{i}, \vec{F})$; exprimer $\sin \alpha$, $\cos \alpha$ et $\tan \alpha$ en fonction de F_x , F_y et $\|\vec{F}\| = F$. Calculer ces valeurs numériquement.

3/ Dans le même système d'axes, représenter le vecteur $\vec{F}' = -2\vec{i} + 3\vec{j}$. Répondre ensuite aux mêmes questions que précédemment.

14.16 Deux forces d'intensité égale (A, \vec{F}_1) et (A, \vec{F}_2) forment entre elles un angle α . Avec $\|\vec{F}_1\| = 2 \text{ N}$, représenter ces deux forces et leur somme vectorielle pour $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 60^\circ$, $\alpha = 90^\circ$ et $\alpha = 180^\circ$; on prendra comme échelle : $2 \text{ cm} \leftrightarrow 1 \text{ N}$.

14.17 Sur un solide, on exerce quatre forces coplanaires et concourantes en un point O ; elles forment entre elles des angles égaux à 90° :

$$(\vec{F}_1, \vec{F}_2) = (\vec{F}_2, \vec{F}_3) = (\vec{F}_3, \vec{F}_4) = 90^\circ.$$

Déterminer $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4$, si l'on a entre les normes de ces vecteurs forces les relations :

$$F_1 = \frac{F_2}{2} = \frac{F_3}{3} = \frac{F_4}{4} = 10 \text{ N}.$$

14.18 Soient deux forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 . On donne :

$$F_1 = 0,2 \text{ N}; \quad F_2 = 0,4 \text{ N}; \quad (\vec{F}_1, \vec{F}_2) = 120^\circ.$$

1/ A l'échelle $2 \text{ cm} \leftrightarrow 0,1 \text{ N}$, représenter \vec{F}_1 et \vec{F}_2 .

2/ Déterminer graphiquement la force $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$.

3/ Déterminer graphiquement la force \vec{F}' telle que

$$\vec{F}' + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{0}.$$

14.19 Dans un repère orthonormé (O, \vec{i}, \vec{j}) , l'unité de force étant le newton, on donne :

$$\vec{F}_1 = 2\vec{i} - 3\vec{j}; \quad \vec{F}_2 = -\vec{i} - 2\vec{j}.$$

1/ Représenter \vec{F}_1 et \vec{F}_2 .

2/ Calculer la norme de chaque force.

3/ Déterminer les angles (\vec{i}, \vec{F}_1) et (\vec{F}_1, \vec{F}_2) .

4/ Tracer $\vec{F} = 2\vec{F}_1 + 4\vec{F}_2$; déterminer l'angle (\vec{i}, \vec{F}) .

5/ Représenter la force \vec{F}' telle que $\vec{F}' + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{0}$.

Quelques actions mécaniques

Poids d'un corps

15.1 forces localisées ponctuellement

Par l'intermédiaire d'un fil, exerçons une force \vec{F} sur une boîte posée sur une table (fig. 1a). Cette force est localisée (on dit parfois concentrée) au « point d'attache » A du fil, c'est-à-dire sur une surface de contact très réduite par rapport aux dimensions de la boîte; cette surface peut être alors assimilée à un point appelé **point d'application** de la force.

Une telle force est dite **localisée ponctuellement**.

- Si nous tirons suivant la diagonale AC , la boîte se déplace en **translation**.
- Accrochons maintenant le fil en B (fig. 1b) et tirons sur le fil encore parallèlement à AC , avec la même force $\vec{F}' = \vec{F}$. Nous observons maintenant un mouvement de la boîte plus compliqué que précédemment, avec un effet de rotation.

Il convient donc de *différencier ces actions*. Pour cela, nous préciserons leurs points d'application respectifs; nous les représenterons par un **vecteur lié**, dont l'origine est le point d'application de la force localisée. Ces vecteurs localisés seront notés (A, \vec{F}) et (B, \vec{F}') .

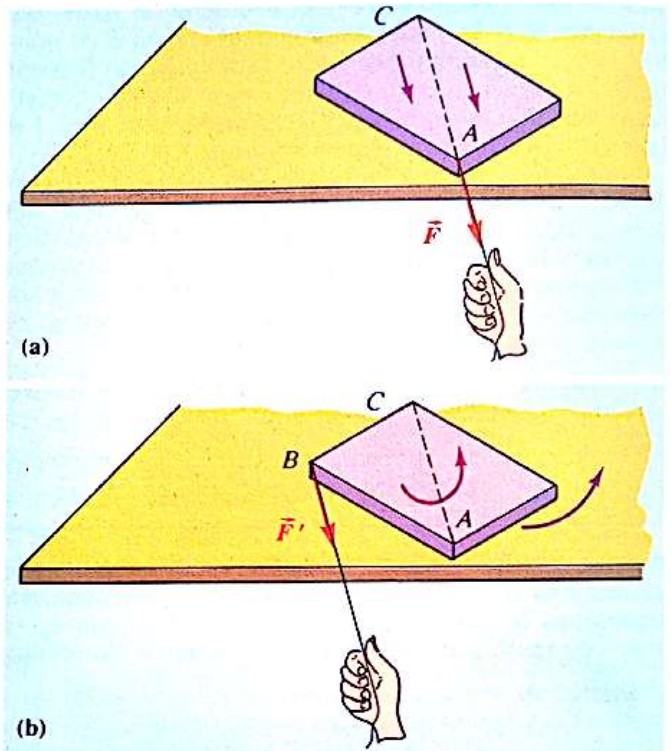
- Une action localisée ponctuellement est complètement représentée par un vecteur lié dont l'origine est le point d'application de la force.

La direction et le point d'application d'une force localisée ponctuellement définissent la **droite d'action**, ou **support de la force**. La longueur du vecteur est proportionnelle à l'intensité de la force.

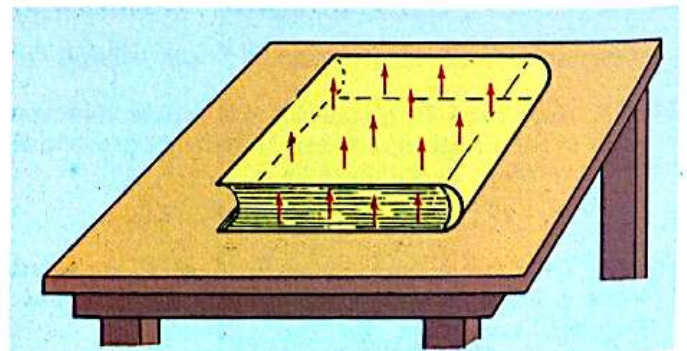
15.2 forces de contact réparties en surface

15.2.1 actions de contact réparties

Ces actions se manifestent lorsqu'un corps est en contact avec un autre corps. L'action que nous exerçons en poussant un camarade avec la paume de la main est répartie sur une surface que nous ne pouvons assimiler à un point; un livre posé sur une table ne tombe pas : la table exerce sur le livre des actions de contact réparties qui le retiennent.



1. L'action d'une force localisée dépend de son point d'application.



2. En chaque point de contact, la table exerce une action sur le livre.

L'action de l'eau sur un sous-marin, l'action du vent sur une voile sont des actions de contact réparties en surface. Elles correspondent à une répartition de forces s'appliquant aux différents points de la surface.

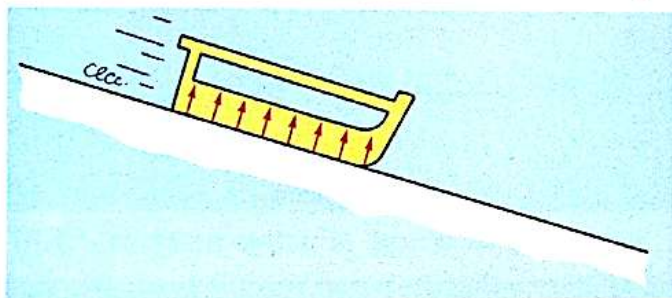
Notons que la localisation ponctuelle est un cas limite où l'élément de surface sur lequel s'exerce l'action est assez petit pour être assimilé à un point.



3. Le vent exerce des actions de contact réparties en surface sur la voile. L'eau exerce également des actions de contact réparties sur la planche.

15.2.2 forces de frottement

Sur une surface inclinée parfaitement lisse (glace, neige dure...), une luge glisse sans difficulté (fig. 4 a). Les forces de contact exercées par la glace sur la luge ne s'opposent pas au mouvement.



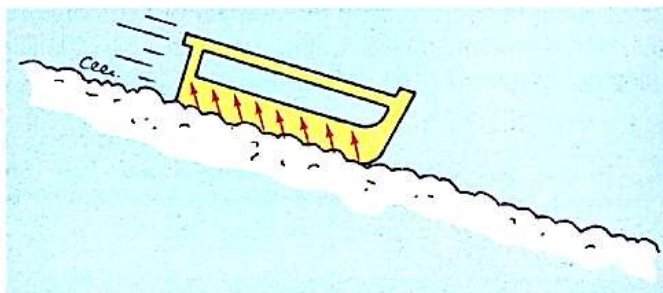
4 a. Sur une surface lisse, les actions de contact ne s'opposent pas au glissement. Elles empêchent la luge de s'enfoncer dans le sol.

Lorsque la luge passe sur une surface plus rugueuse (sable, terre...), elle est freinée, voire immobilisée (fig. 4 b). Les forces de contact s'opposent cette fois au glissement : on dit qu'il y a des *frottements*.

Les forces de frottement s'exercent toujours à la surface de contact de deux systèmes matériels. Il peut s'agir du contact de deux solides (frottement solide) ou d'un solide et d'un fluide (frottement fluide). L'intensité de ces forces dépend de la nature des corps en contact et, pour le frottement fluide, de leur vitesse de déplacement les uns par rapport aux autres.

Pour limiter les frottements solides, on peut polir ou lubrifier les surfaces en contact, utiliser des roulements (à bille par exemple), mais une nouvelle technique se développe : le coussin d'air (voir document).

Les forces de frottement exercées par l'air sur une voiture en mouvement la ralentissent. Par souci d'économie d'énergie, les constructeurs améliorent sans cesse le « CX » de leur modèle. C'est un coefficient qui traduit une plus ou moins grande résistance à l'avancement de l'automobile dans l'air; plus le CX est grand, plus la résistance de l'air à l'avancement est grande. A titre d'exemple, le CX d'une Peugeot 309 est de 0,30.



4 b. Sur une surface rugueuse, les actions de contact, tout en empêchant la luge de s'enfoncer dans le sol, s'opposent à son glissement.



5. L'écoulement de l'air autour d'une carrosserie est mis en évidence, dans une soufflerie, par des filets de fumée.

15.2.3 forces pressantes

L'eau exerce des forces réparties sur toute la surface d'un barrage. Ces forces sont appelées **forces pressantes**. On montre que sur un élément de surface s , centré sur un point M , la force pressante \vec{F} agissant sur cet élément est perpendiculaire à la surface et tend à la repousser. On définit alors la pression en M par :

$$p = \frac{F}{s}$$

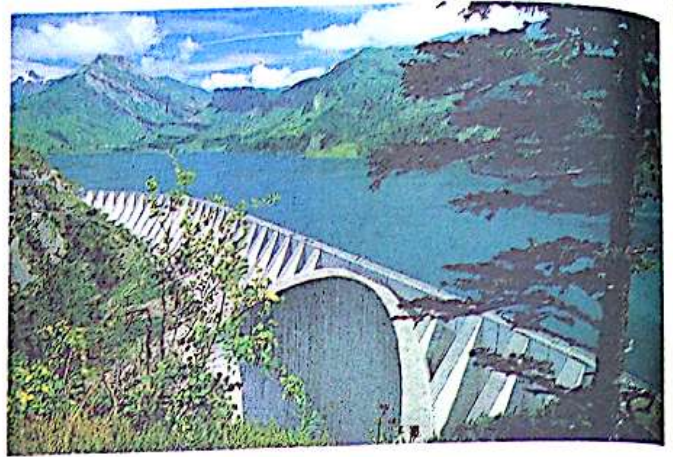
Pa N
 m²

avec p en pascals (symbole : Pa), F en newtons et s en m².

L'air exerce également sur les objets des forces pressantes réparties. En tout point de l'atmosphère est définie une pression appelée *pression atmosphérique*. En météorologie, cette pression s'exprime surtout en millibars (symbole : mb); 1 mb = 10² Pa. La pression atmosphérique moyenne est de 1013 mb au niveau de la mer.

La somme des forces pressantes qui s'exercent sur un corps situé dans un liquide ou dans un gaz est appelée *poussée d'Archimède*. Nous indiquerons ses caractéristiques au chapitre 20 (page 207).

7. Ce sont les forces pressantes exercées par l'air sur l'enveloppe, qui maintiennent un ballon en sustentation. ▶



6. L'eau exerce des forces pressantes réparties sur la surface du barrage.



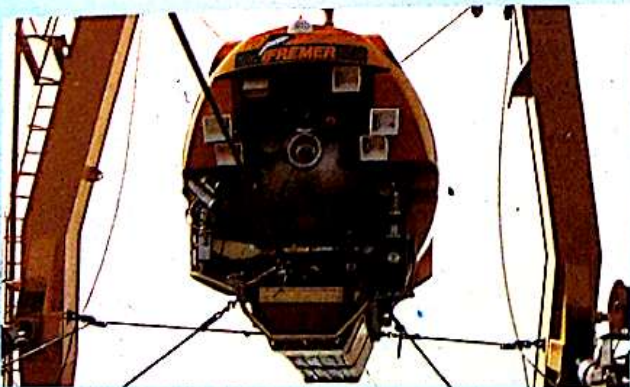
Application 1 :

Calculer l'intensité de la somme des forces pressantes qui s'exercent sur 1 cm² de la partie externe de votre tête.

L'intensité de cette force est donnée par $F = p \cdot s$; avec $p = 1013 \text{ mb} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ et $s = 10^{-4} \text{ m}^2$:

$$F = 1,013 \cdot 10^5 \cdot 10^{-4} \approx 10 \text{ N.}$$

Si le sommet de votre crâne, assimilé à une surface plane de 170 cm², est soumis à cette pression, la force qu'il subit est égale à $170 \times 10 = 1700 \text{ N}$. Tout se passe comme si on vous posait sur la tête une masse de 170 kg! Heureusement que votre tête n'est pas vide!



Application 2 :

Le sous-marin français de recherche en mer profonde, le Nautilus, a réussi le 14 mars 1985 sa plongée d'épreuve, avec un équipage de 5 hommes, à 5800 m de profondeur au large du Japon. Sachant que la pression à cette profondeur est de l'ordre de $5,9 \cdot 10^7$ pascals (soit environ 500 fois la pression atmosphérique au niveau de la mer), calculer la force qu'exerce l'eau sur un hublot de 20 cm de diamètre.

Les forces pressantes qui s'exercent sur le hublot sont perpendiculaires à ce dernier et ont tendance à le faire pénétrer dans le sous-marin. La somme des forces qui s'exercent de l'extérieur vers l'intérieur sur le hublot est égale à :

$$F = p \cdot s = p \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4}$$

$$F = 5,9 \cdot 10^7 \times 3,14 \times \frac{(0,2)^2}{4} = 1,85 \cdot 10^6 \text{ N.}$$

Tout se passe comme si le hublot supportait une masse de 180 000 kg, soit 180 tonnes. On comprend pourquoi il est très difficile de construire des sous-marins capables d'atteindre de telles profondeurs.

◀ Le Nautilus.

15.3 poids d'un corps

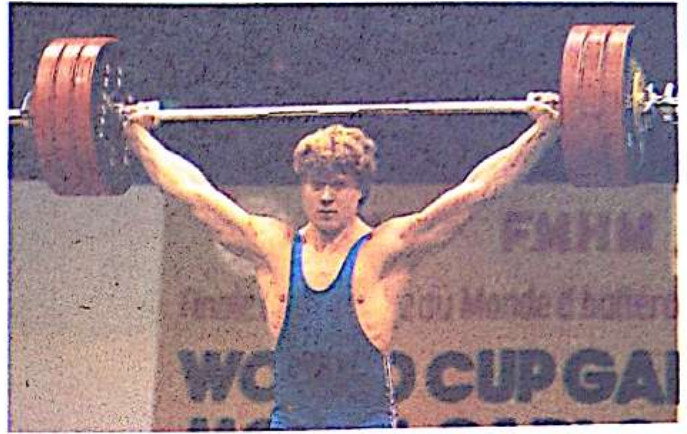
Tous les objets sont attirés vers le sol : ils sont soumis aux forces de pesanteur. Ces forces sont essentiellement dues à l'attraction gravitationnelle exercée par la Terre. Elles s'exercent sur tous les éléments matériels constituant le corps; ces forces sont réparties dans tout le volume du système matériel considéré.

- La somme des forces de pesanteur, notée \vec{P} , est appelée poids du corps.

Remarque : on peut définir un poids sur un astre quelconque. L'attraction gravitationnelle, c'est-à-dire la propriété qu'ont deux corps de s'attirer, est une propriété générale de la matière (voir chapitre 16).

Nous verrons au chapitre 20 qu'il est commode de considérer le poids comme une force unique appliquée en un point appelé centre de gravité et noté G (fig. 9).

Le vecteur \vec{P} , dirigé vers le bas, définit la verticale du lieu considéré; cette direction est celle du fil à plomb.



8. Les forces de pesanteur que doit vaincre l'athlète s'appliquent en chaque point des haltères. Le poids, lui, est appliqué au milieu de la barre.

15.4 poids, masse et champ de pesanteur

15.4.1 relation entre le poids et la masse

La masse d'un objet est liée à la quantité de matière qui le constitue. Elle est invariable.

Une masse se mesure habituellement avec une balance (voir fiche technique). L'unité de masse est le kilogramme (symbole : kg).

Le poids d'un objet dépend évidemment de l'objet considéré. Mais pour différents objets, et en un lieu donné, on constate que les rapports entre leur poids (mesuré au dynamomètre) et leur masse (mesurée avec une balance) est le même. On exprime cette dépendance en écrivant :

$$P = m \cdot g$$

$\begin{array}{ccc} & N & \\ & / \quad \backslash & \\ & kg & N \cdot kg^{-1} \end{array}$

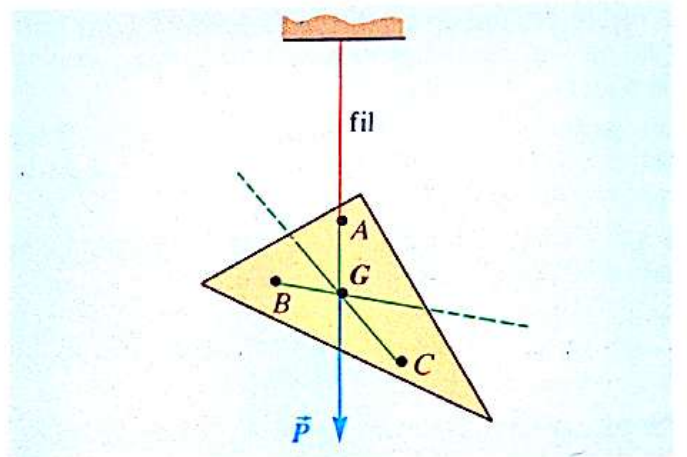
où P , intensité du poids, est mesurée en newtons, m , masse du corps, en kilogrammes et g , intensité de la pesanteur, caractéristique du lieu, en newtons par kilogramme (symbole : $N \cdot kg^{-1}$). A Paris :

$$g = 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Afin de faire apparaître la nature vectorielle du poids, on écrit aussi :

$$\vec{P} = m \cdot \vec{g}.$$

\vec{g} est le vecteur champ de pesanteur; sa direction est par définition celle de la verticale du lieu. Son sens est dirigé vers le bas. Sa norme g est l'intensité de la pesanteur.



9. Pour différents points d'attache du fil (en A, B, C...), on trace, sur le solide suspendu, la direction du fil tendu. Ces directions se coupent en un même point, appelé centre de gravité du solide. Pour un triangle, le centre de gravité est le point d'intersection des médianes. (Voir chapitre 20.)

15.4.2 variation de g avec le lieu

Des mesures précises montrent que le poids d'un même corps n'est pas le même en tous les points du globe terrestre (un corps est plus «léger» au sommet du Mont-Blanc qu'au bord de la mer). La masse étant une grandeur invariable, d'après la relation $P = m \cdot g$ on en déduit que g dépend du lieu.

• g diminue avec l'altitude (on s'éloigne alors de la Terre). On peut donner une loi approximative, conséquence de la loi de Newton sur la gravitation universelle :

$$g = g_0 \cdot \frac{R^2}{(R+h)^2},$$

où g_0 est l'intensité de la pesanteur au sol, R le rayon terrestre, h l'altitude.

• g varie légèrement avec la latitude du lieu.

Équateur : $g = 9,78 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$; pôles : $g = 9,83 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$.

• Au voisinage d'un même lieu, g varie légèrement selon la nature des roches constituant le sous-sol. C'est ainsi que l'on peut localiser certains minerais ou des gisements de pétrole.

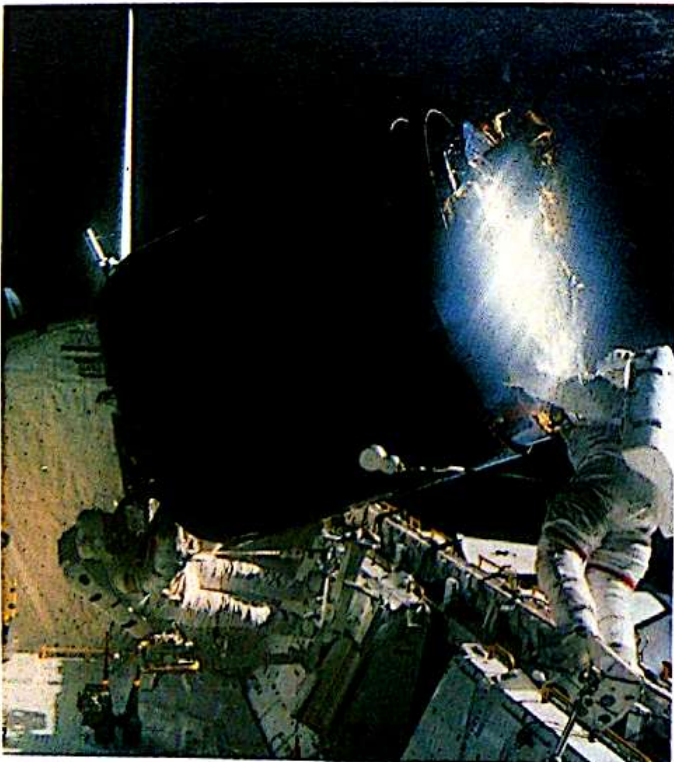
Les variations de g à la surface de la Terre sont si faibles (inférieures à 0,5 %) que l'on adoptera couramment la valeur $g = 9,8 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$.

• A la surface d'un astre autre que la Terre, g aura une valeur différente. Ainsi g a pour valeur :

- sur la Lune : $1,6 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$,
- sur Mars : $3,9 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$,
- sur Jupiter : $26 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Par exemple, un astronaute ayant une masse de 120 kg, équipement compris, a un poids :

- sur la Terre de 1777 N,
- sur la Lune de 194 N, soit environ 6 fois moins!



◀ 10. Ces deux astronautes ramènent à bout de bras un satellite de masse 600 kg! L'effet du poids n'est plus sensible, pour les astronautes, dans la navette spatiale satellisée.

\bar{P} varie avec l'altitude	Chamonix 1 008 m	Mont-Blanc 4 807 m
m (kg)	100	100
g ($\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$)	9,809	9,806
P (N)	980,9	980,6

\bar{P} varie avec la latitude	Paris	pôle Nord	équateur
m (kg)	100	100	100
g ($\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$)	9,81	9,83	9,78
P (N)	981	983	978

15.4.3 conclusion

- Poids et masse sont deux grandeurs différentes. La masse, invariable, est représentée par un réel positif et se mesure en kilogrammes. Le poids est une force; il est représenté par un vecteur. Son intensité se mesure en newtons.

- Poids et masse sont reliés par :

$$\vec{P} = m \cdot \vec{g}$$

où \vec{g} est le vecteur champ de pesanteur, dont l'intensité dépend du lieu considéré.

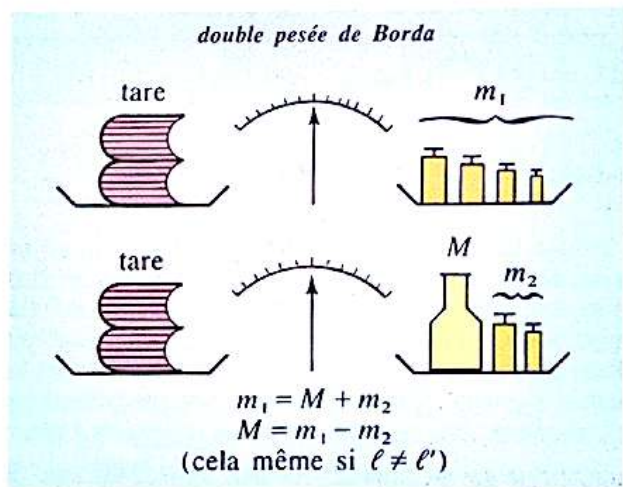
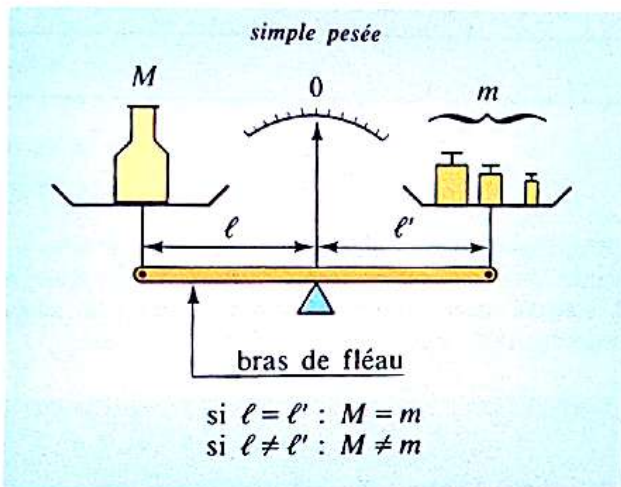
Fiche technique

la balance

- *Balances à double plateaux*

Si les bras de fléau ont des longueurs l et l' égales, la balance est juste; une simple pesée suffit. Mais

généralement l diffère légèrement de l' et il est nécessaire de faire une double pesée.

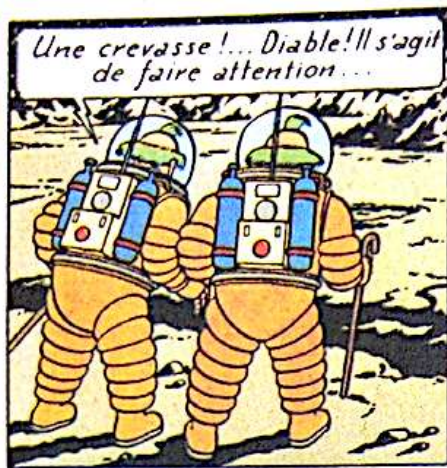


- *Balances monoplateau*

Les balances monoplateau à affichage numérique sont de plus en plus utilisées au laboratoire et dans le commerce. Elles sont supposées justes (il n'est pas possible de faire une double pesée!).

Sur certaines balances de commerçants, un dispositif électronique permet d'afficher, en même temps que la masse du produit acheté, le prix à payer.

◀ *Balance monoplateau de laboratoire. Sa charge maximale est de 31 g, sa précision d'affichage de 0,01 mg, soit 10 μ g.*



Sur la lune, le poids d'un corps est divisé environ par 6. Les résultats peuvent être surprenants...

DOCUMENT

La technique du coussin d'air

Une armoire pleine est difficile à déplacer, surtout si le sol est rugueux. L'effort que l'on doit exercer pour déplacer un objet posé sur une surface dépend de la masse de l'objet et de l'état de la surface. Les frottements s'opposent au déplacement. Pour diminuer ceux-ci, nous pouvons polir les surfaces en contact, les enduire d'un produit favorisant le glissement (les graisser par exemple), utiliser des roulements (roues ou roulements à billes).

Une technique qui se développe de plus en plus est celle du *coussin d'air*. Elle consiste à maintenir entre la surface et l'objet à déplacer une couche d'air pulsé, qui compense l'effet du poids qui tend à plaquer l'objet sur la surface, et sur laquelle l'objet semble *flotter*. L'objet n'est plus en contact avec la surface : son déplacement, parallèlement à la surface, ne demande pratiquement aucun effort (le frottement de l'air déplacé peut être négligé).

On construit, selon ce procédé, des véhicules (*overcraft*), des tondeuses à gazon : ces engins se maintiennent au-dessus de l'eau ou du sol grâce à l'air qu'ils propulsent sous eux; ils sont *autoporteurs* (ils se portent eux-mêmes). L'usine Volvo utilise des chariots *autoporteurs* pour transporter les pièces automobiles; un homme peut ainsi déplacer horizontalement un matériel de cinq tonnes sans effort.

Nous utilisons cette technique au laboratoire pour étudier le mouvement sans frottement d'un solide. Il existe différents modèles de tables à coussin d'air destinées à de telles études; ou bien l'air est soufflé verticalement à travers une plaque horizontale percée d'un grand nombre de trous : l'objet dont on veut étudier le mouvement *flotte* sur cet air pulsé, ou bien le mobile est *autoporteur*, c'est-à-dire qu'il souffle, sous lui, l'air qui le sustente.

Certains « mobiles » sont munis d'une petite lampe à éclairage intermittent. Les positions successivement occupées par la lampe sont photographiées. D'autres mobiles possèdent un système de marquage; au cours du mouvement, les marqueurs, points

particuliers du mobile, laissent des traces sur la table ou sur une feuille fixée à la table au-dessus de laquelle se déplace l'engin. L'intervalle de temps entre deux marquages peut être en général réglé, mais est constant au cours d'une expérience.

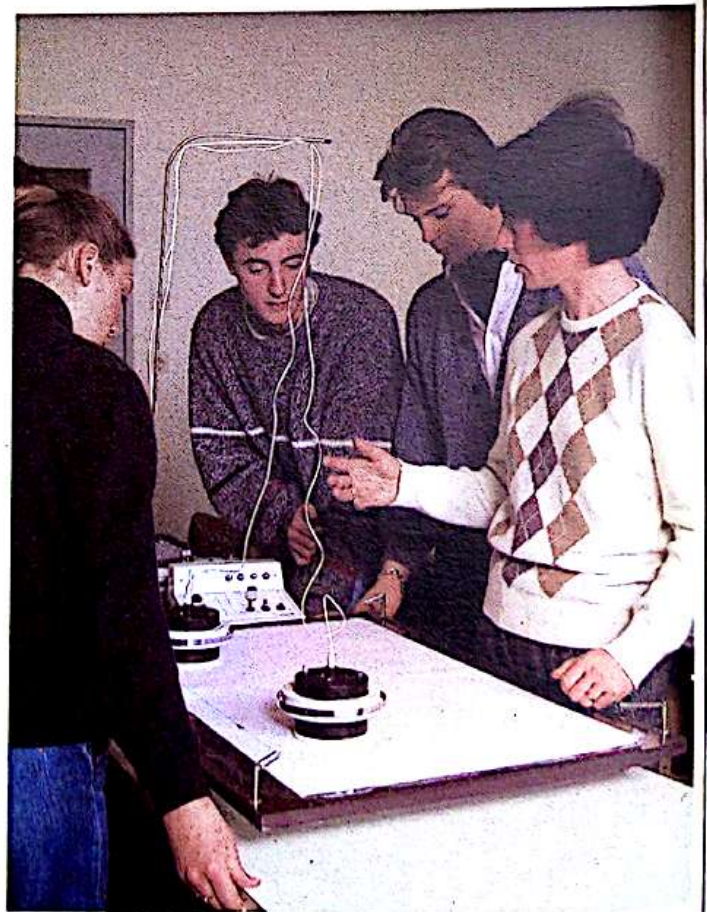


Table à coussin d'air à enregistrement photographique.

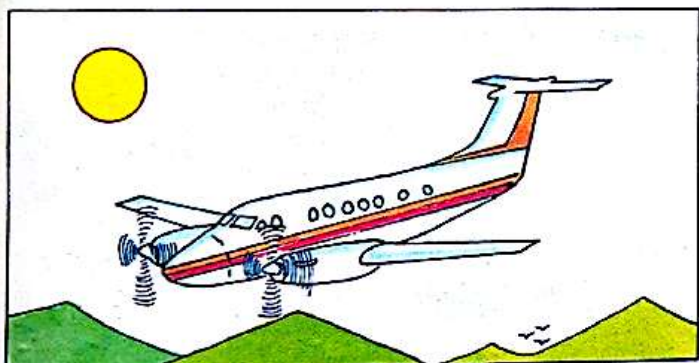
Faire le point

- Comment représenter une force localisée?
- Citer quelques exemples de forces réparties.
- Quelles sont les différences entre la masse et le poids d'un corps?
- Définir le champ de pesanteur terrestre.
- Quelle est la valeur moyenne de g à la surface terrestre?

15.1 Classer dans l'une des deux catégories : *forces concentrées* ou *forces réparties*, les actions exercées par :

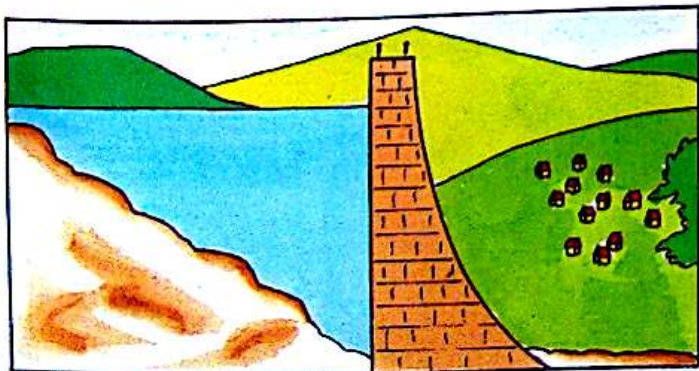
- le vent sur une voile;
- de l'eau sur un barrage;
- une locomotive sur un wagon;
- un aimant sur un clou;
- un câble sur une péniche;
- une chaise sur le sol.

15.2 Un avion vole horizontalement. Il est mû par des moteurs à hélice. A quelles actions est-il soumis?



15.3 Une balle de ping-pong est retenue au fond d'un récipient plein d'eau. La balle est lâchée. Faire le bilan des actions qui s'exercent sur elle et décrire les effets produits.

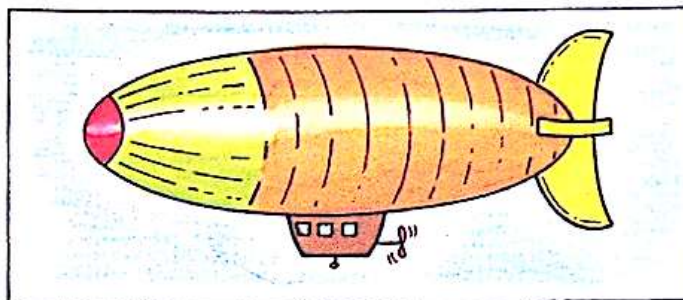
15.4 Un barrage est toujours plus épais à la base qu'au sommet. Que pouvez-vous dire des intensités des différentes forces réparties s'exerçant sur le barrage? On admettra que la direction de ces forces est perpendiculaire à la surface du barrage en contact avec l'eau.



15.5 On exerce sur une punaise, à l'aide d'un doigt, une force de 10 N pour l'enfoncer. Quelles sont les caractéristiques de l'action exercée par le doigt sur la punaise? Évaluer la pression exercée (surface pressée 1 cm^2). La punaise transmet intégralement la force de 10 N; calculer la pression exercée par la pointe de la punaise (surface $0,01 \text{ mm}^2$). Conclure.

15.6 Citer des actions mécaniques s'exerçant à distance (exemples étudiés dans les classes antérieures).

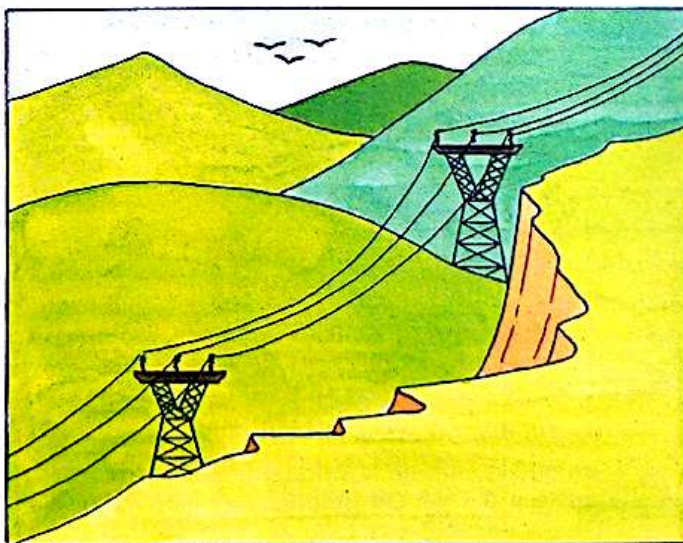
15.7 Analyser les actions exercées sur un dirigeable et représenter les forces appliquées.



15.8 Représenter l'action d'une chaise sur le sol. Représenter l'action exercée par le sol sur une voiture en stationnement.

15.9 Décrire et représenter l'action d'un aimant lorsqu'on l'approche d'une aiguille aimantée (boussole par exemple).

15.10 Entre deux pylônes, les câbles électriques présentent une certaine courbure; représenter en quelques points situés le long des câbles, les actions dues aux forces de pesanteur. Quelles sont les directions des forces exercées par les câbles sur les pylônes?



15.11 1/ Sur des emballages, on peut lire l'expression « poids net, 1,2 kg ». Cette expression est-elle correcte?
2/ On peut prendre comme unité de force le décanewton;

en prenant $g \approx 10 \text{ N.kg}^{-1}$, quelle particularité apparaît alors entre les mesures de la masse et du poids d'un même objet?

15.12 La pression dans l'eau, à une profondeur h au-dessous du niveau de l'eau d'un barrage, est donnée par la relation :

$$p - p_0 = h \cdot \rho \cdot g$$

avec $p_0 = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ (pression atmosphérique); ρ : masse volumique de l'eau; $g = 10 \text{ N.kg}^{-1}$.

Évaluer la force moyenne qui s'exerce sur la partie immergée d'une vanne assimilable à un disque circulaire de diamètre $d = 1 \text{ m}$ et située à une profondeur $h = 60 \text{ m}$. Quelle est l'intensité des forces de contact exercées par le béton sur les scellements de la vanne (scellement destinés à résister à la poussée qui s'exerce sur la vanne)?



15.13 A 10000 m, la pression de l'air à l'extérieur est égale à environ 310 millibars. A l'intérieur de l'avion, la pression est maintenue à 1013 millibars.

1/ Calculer la force pressante qui s'exerce sur la face intérieure d'un hublot de 30 cm de diamètre.

2/ Calculer la force pressante qui s'exerce sur la face extérieure du hublot.

3/ A quelle force les fixations du hublot doivent-elles résister?

15.14 A Paris, quel est le poids d'un stylographe de masse égale à 52 grammes?

15.15 La masse d'Arthur est de 58 kg. Quel est son poids sur la Terre? sur la Lune? g (Terre) = $9,81 \text{ N.kg}^{-1}$; g' (Lune) = $1,62 \text{ N.kg}^{-1}$.

15.16 Au voisinage de la Terre, g varie avec l'altitude h selon la loi approximative :

$$g_h = g_0 - 3,08 \cdot 10^{-6} \cdot h$$

(unités du système international).

A partir de quelle altitude la variation relative $(g_0 - g_h)/g_0$ est-elle égale à 0,5 %? On prendra $g_0 = 9,81 \text{ N.kg}^{-1}$.

15.17 L'intensité du champ de gravitation terrestre, assimilable au champ de pesanteur, varie avec l'altitude h selon la relation :

$$g = g_0 \cdot \frac{R^2}{(R + h)^2}$$

avec $R = 6370 \text{ km}$, rayon de la Terre, et $g_0 = 9,81 \text{ N.kg}^{-1}$, intensité du champ de pesanteur à la surface de la Terre.

1/ Calculer la force d'attraction gravitationnelle, assimilable au poids, d'un engin spatial de masse $m = 1 \text{ tonne}$, qui décrit autour de la Terre une trajectoire circulaire à l'altitude $h = 400 \text{ km}$. Comparer au poids de l'engin sur la Terre.

2/ La distance Terre-Lune est d'environ 380000 km. A la surface de la Lune, le champ de gravitation a une intensité $g'_0 = 1,62 \text{ N.kg}^{-1}$. Le véhicule spatial est posé sur le sol lunaire : comparer l'attraction gravitationnelle exercée par la Lune (poids lunaire) à celle qu'exerce encore la Terre (poids terrestre).

3/ Indiquer la position du point situé entre la Terre et la Lune où les attractions terrestre et lunaire se compensent. L'intensité du champ de pesanteur lunaire g' varie avec l'altitude selon la même loi que g . Le rayon de la Lune est $R' = 1740 \text{ km}$.

15.18 La photographie représente un skieur en pleine vitesse. Indiquer l'orientation des forces de frottement qui s'exercent sur lui. A quoi sont dus ces frottements? Quelle est la force qui fait avancer (descendre) le skieur?

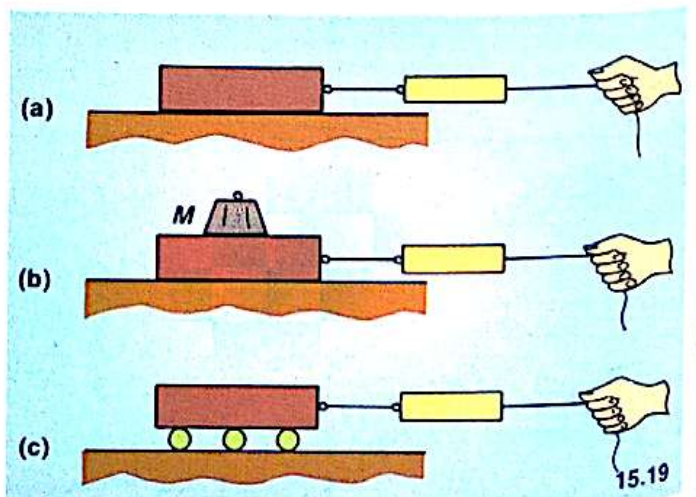


15.19 Pour mettre en évidence les forces de frottement, on a réalisé les trois expériences suivantes :

- On tire une brique posée sur le sol horizontal à l'aide d'un fil relié à un dynamomètre; soit F_1 la force minimale nécessaire pour la mettre en mouvement.

- On rajoute sur la brique une masse marquée M ; soit alors F_2 la force minimale nécessaire.

- On place sous la brique des petits rouleaux; soit alors F_3 la force minimale.



1/ Pourquoi, dans les trois cas, est-il nécessaire d'exercer une force? Quelles sont les forces qui s'opposent au mouvement?

2/ Par expérience ou par intuition, choisir les réponses exactes :

$$F_1 < F_2; \quad F_1 > F_2; \quad F_1 \gg F_3; \quad F_3 \ll F_1.$$

Conclure.

Mesures à l'aide d'un dynamomètre

15.20 A un ressort suspendu par l'une de ses extrémités, on accroche différentes masses marquées et on note l'allongement provoqué :

m en g	100	150	280	450
($\ell - \ell_0$) en cm	4	6	11,2	18

1/ Tracer le graphique donnant l'intensité du poids des masses, en fonction de l'allongement $\Delta\ell = \ell - \ell_0$. On prendra $g = 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$.

2/ En déduire la raideur du ressort.

3/ Une masse suspendue à l'extrémité du ressort provoque un allongement de 8 cm. Quelle est la masse du corps suspendu?

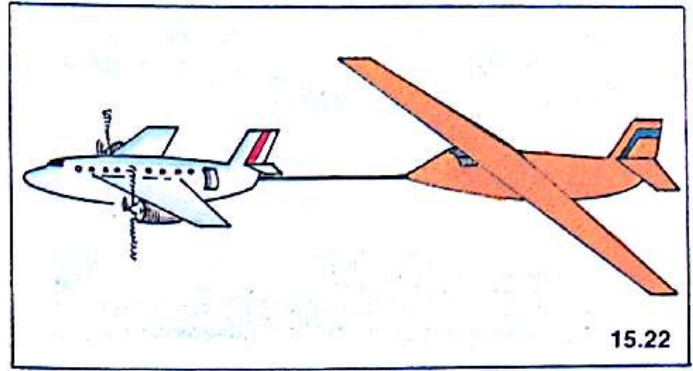
15.21 On étalonne un ressort à spires non jointives à l'aide de différentes masses marquées et on note la longueur ℓ du ressort.

m en g	100	200	400	500
ℓ en cm	12	14	18	20

1/ A l'aide d'une représentation graphique simple, montrer qu'il existe une relation affine entre le poids des masses marquées et la longueur ℓ ($g \approx 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$). Quelle est la longueur à vide ℓ_0 du ressort? Quelle est sa raideur k ?

2/ On applique aux extrémités du ressort deux forces opposées d'intensité 2,5 N. Quel est l'allongement provoqué?

15.22 Un avion tire un planeur horizontalement, à vitesse constante. Le câble exerce sur le planeur une traction \vec{T} de 4000 N; le poids \vec{P} du planeur est égal à 2000 N.



15.22

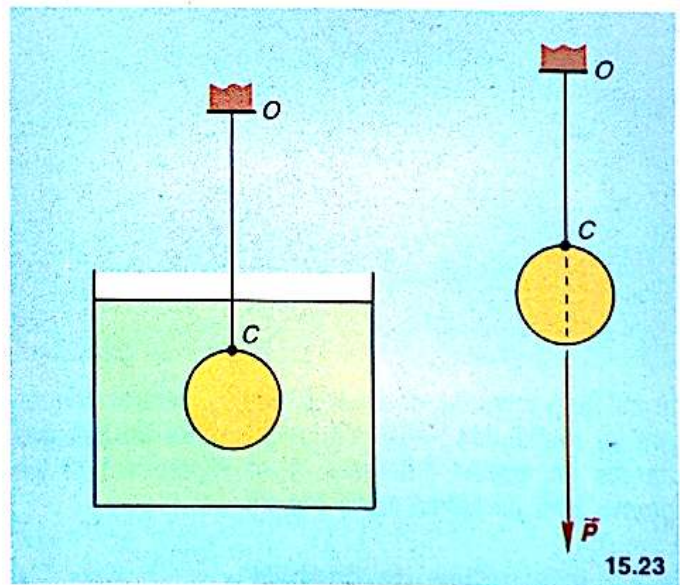
1/ L'action de l'air sur le planeur est représentée par un vecteur \vec{F} tel que, lorsque la vitesse est constante, on ait : $\vec{F} + \vec{T} + \vec{P} = \vec{0}$. Représenter ces trois forces sur un schéma.

2/ Déterminer \vec{F} , somme des forces dues à l'air, et l'angle que fait sa direction avec la verticale.

15.23 On suspend une boule à l'aide d'un fil accroché en un de ses points, C. La direction du fil est une verticale passant par C; l'action des forces de pesanteur est représentée par une force \vec{P} dont la droite d'action est colinéaire au fil. On néglige les actions de l'air sur la boule. Soit \vec{T} l'action du fil sur la boule (tension du fil).

1/ Sachant que $\vec{T} + \vec{P} = \vec{0}$ et que les droites d'action de ces deux forces sont colinéaires, représenter \vec{T} ; échelle de représentation : 4 cm \leftrightarrow 10 N. On donne $P = 5 \text{ N}$.

2/ On plonge la boule dans un récipient contenant de l'eau; le fil reste tendu. A quelles actions la boule est-elle soumise? La poussée d'Archimède peut être représentée par un vecteur \vec{F} . Sachant que sa ligne d'action est colinéaire à celle de \vec{P} et à celle de la nouvelle tension \vec{T}' du fil et que $\|\vec{F}\| = \|\vec{P}\|/2,7$, représenter le vecteur \vec{T}' et calculer sa norme.



15.23

Interactions

16.1 mise en évidence

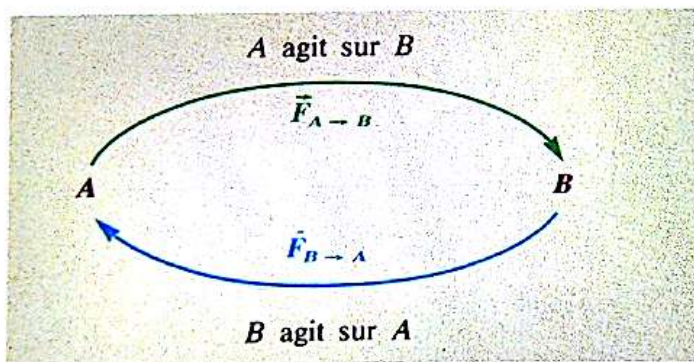
16.1.1 interaction à distance

Tentons d'approcher les pôles nord de deux aimants A et B : nous sentons qu'ils se repoussent. Les aimants qui agissent l'un sur l'autre sont en *interaction*, interaction que nous noterons ($A \leftrightarrow B$).

Réalisons l'expérience schématisée figure 1 : nous observons la mise en mouvement *simultanée* des deux chariots lorsqu'on brûle le fil.

- L'action de A sur B ($A \rightarrow B$) provoque la mise en mouvement de B . Cette action est caractérisée par la force $\vec{F}_{A \rightarrow B}$.
- L'action de B sur A ($B \rightarrow A$) provoque la mise en mouvement de A . Cette action est caractérisée par la force $\vec{F}_{B \rightarrow A}$.

Nous pouvons schématiser cette interaction par :

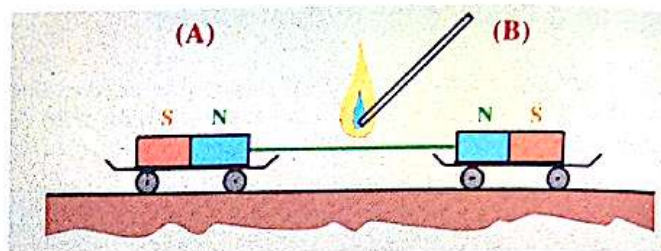


De même les boules de deux pendules électrostatiques sont en interaction : elles s'attirent si elles portent des charges de signes différents et se repoussent si les charges sont de même signe (fig. 2).

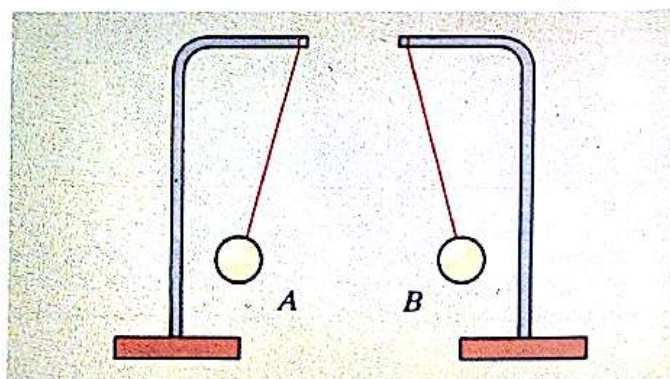
16.1.2 interaction de contact

Jean (J) repousse une table (T). L'action mécanique $\vec{F}_{J \rightarrow T}$ exercée par Jean sur la table met celle-ci en mouvement. Existe-t-il, comme dans le cas précédent, une *action réciproque* $\vec{F}_{T \rightarrow J}$ exercée par la table sur Jean?

On peut le penser en observant qu'au contact de la table, les mains de Jean sont légèrement déformées (marques rouges).

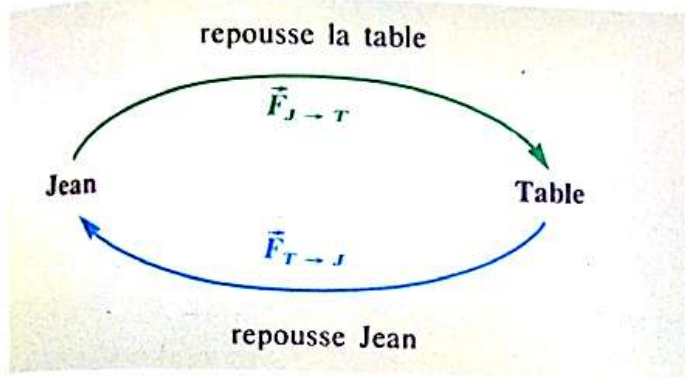


1. Les aimants se repoussent. Lorsqu'on brûle le fil, le chariots partent dans des sens opposés.



2. On fabrique un pendule électrostatique en suspendant à un fil une boule de papier d'aluminium. Après avoir frotté par exemple une règle de plastique avec un tissu, on touche chacun des pendules. Ils sont alors électrisés de la même façon et se repoussent.

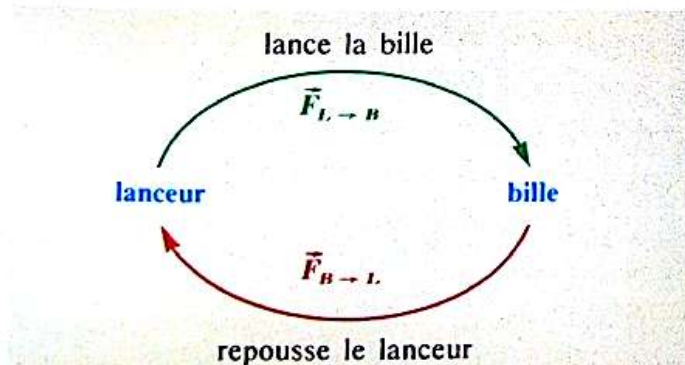
Pour mettre en évidence l'action de la table, modifions l'expérience. Jean renouvelle sa poussée, mais il est, cette fois, chaussé de patins à roulettes! Lors de l'interaction Jean est repoussé par la table. Lorsqu'il tente de repousser la table il y a bien une interaction de contact ($J \leftrightarrow T$) caractérisée par les forces $\vec{F}_{J \rightarrow T}$ et $\vec{F}_{T \rightarrow J}$.



Notons que lorsque Jean n'est pas chaussé de patins, l'action exercée sur lui par la table existe de la même façon, mais elle est peu perceptible quant à ses effets. Inspirons-nous maintenant du flipper et brûlons le fil qui retient le ressort du lanceur de billes (L) représenté ci-contre (fig. 3 a). Le piston, poussé par le ressort, lance la bille (B). L'action ($L \rightarrow B$) provoque la mise en mouvement de B .

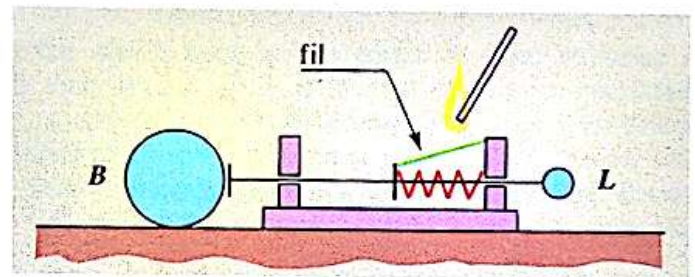
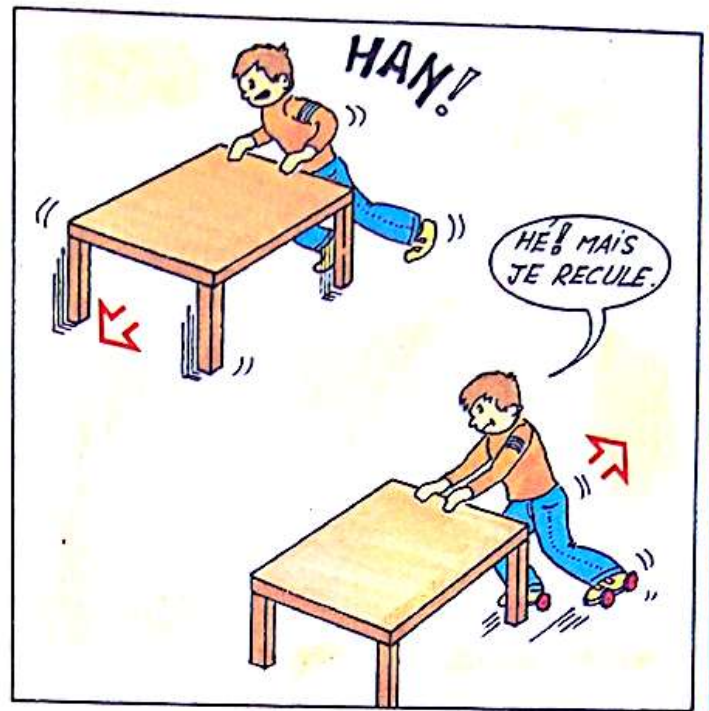
L'action ($B \rightarrow L$) existe aussi et peut mettre en mouvement le lanceur (L) à condition de rendre mobile ce dernier. Plaçons pour cela deux barreaux cylindriques sous l'appareil (fig. 3 b) et recommençons l'expérience : nous observons la mise en mouvement simultanée de la bille et du lanceur. Sans ces barreaux, l'action ($B \rightarrow L$) serait difficilement perceptible.

Lanceur et bille sont en interaction, interaction représentée par les forces $\vec{F}_{B \rightarrow L}$ et $\vec{F}_{L \rightarrow B}$.

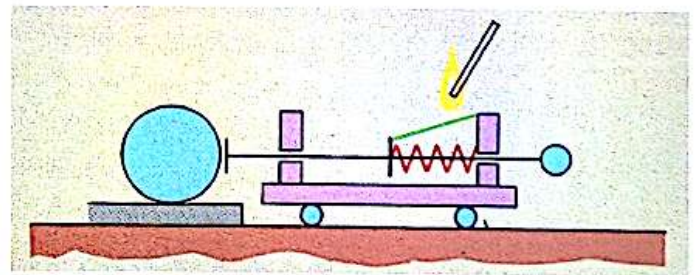


• Si un corps A exerce sur un corps B une force $\vec{F}_{A \rightarrow B}$, alors B exerce sur A une force $\vec{F}_{B \rightarrow A}$. On dit qu'il y a interaction entre A et B .

De ces deux actions, une seule, très souvent, est perceptible à cause des masses très différentes des objets, des forces de frottement ou d'autres forces qui s'exercent sur l'un seulement des deux corps.



3a. Mise en évidence de l'action du lanceur sur la bille.



3b. Mise en évidence de l'action de la bille sur le lanceur.

16.2 principe d'interaction

16.2.1 constatations expérimentales

Les deux chariots portant les aimants partent dans des sens opposés; il en est de même de Jean et de la table, de la bille et du lanceur. On peut donc penser que les deux forces d'interaction $\vec{F}_{A \rightarrow B}$ et $\vec{F}_{B \rightarrow A}$ ont même direction, mais des sens opposés.

Accrochons deux dynamomètres comme le montre la figure 4. Qu'ils soient au repos ou en mouvement, ces deux dynamomètres A et B nous donnent la même indication : les forces $\vec{F}_{A \rightarrow B}$ et $\vec{F}_{B \rightarrow A}$ ont même intensité.

D'autre part, nous constatons que ces forces ont même support, mais des sens opposés. Tout cela se traduit par :

- $\vec{F}_{A \rightarrow B} = -\vec{F}_{B \rightarrow A}$;
- même droite d'action pour les deux forces.

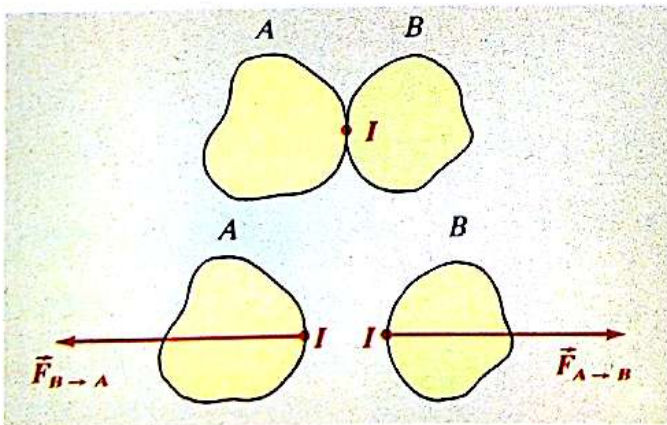
16.2.2 énoncé du principe d'interaction

Le résultat précédent, établi dans un cas particulier, est général. On pose en Principe :

- Lorsqu'un corps A exerce sur un corps B une action mécanique caractérisée par une force $\vec{F}_{A \rightarrow B}$, le corps B exerce sur A une réaction caractérisée par une force $\vec{F}_{B \rightarrow A}$. Que les corps soient au repos ou en mouvement, les forces caractérisant l'interaction sont directement opposées, c'est-à-dire que :

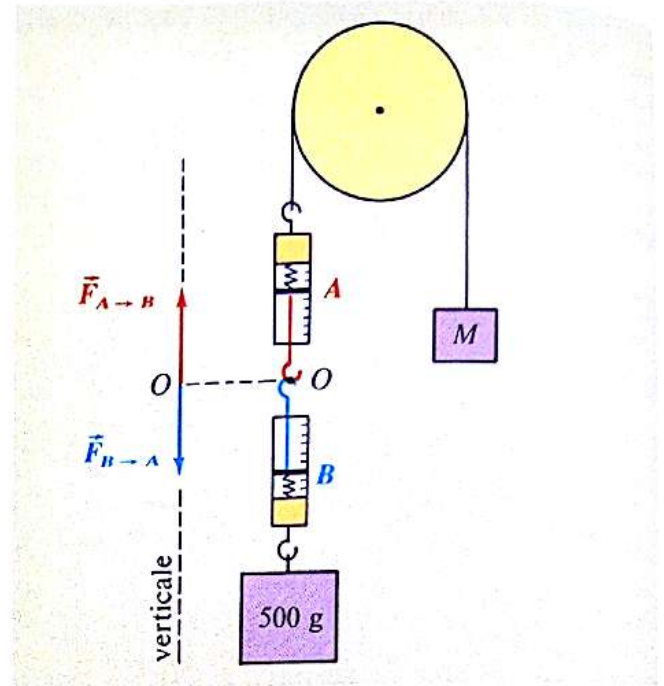
$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{F}_{A \rightarrow B} = -\vec{F}_{B \rightarrow A} ; \\ \text{les deux forces ont même droite d'action.} \end{array} \right.$$

Les forces $\vec{F}_{A \rightarrow B}$ et $\vec{F}_{B \rightarrow A}$ satisfaisant à ces deux propriétés sont dites « directement opposées » (fig. 5).



5. Pour bien marquer les forces d'interaction subies par A et B, nous avons redessiné séparément les deux corps.

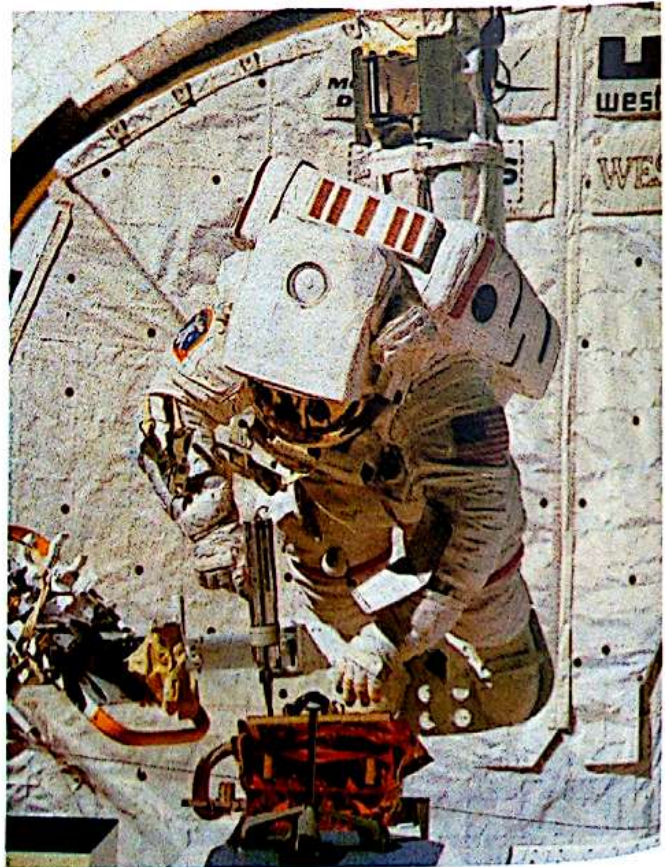
6. Le Principe d'interaction et les dangers du bricolage dans l'espace. Dans l'espace, en état d'apesanteur, un banal tour de vis et l'astronaute tourne sur lui-même. Des outils spéciaux sont donc nécessaires : marteaux « sans recul » ou tournevis « sans couple ».



4. Les dynamomètres et la poulie ont des masses négligeables devant les masses marquées. Le dynamomètre A mesure la force exercée à son extrémité, soit $\vec{F}_{B \rightarrow A}$; le dynamomètre B mesure, de même, la force $\vec{F}_{A \rightarrow B}$.

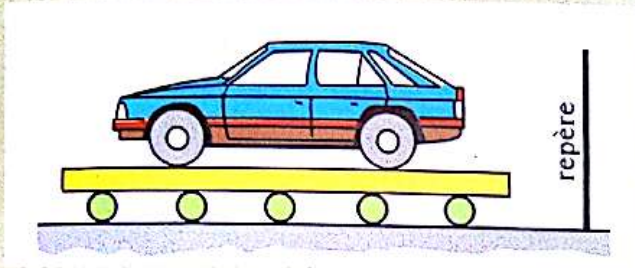
Que le système soit en mouvement ou au repos, les deux dynamomètres A et B donnent la même indication :

- les deux forces ont même intensité, mais sont de sens opposés : $\vec{F}_{A \rightarrow B} = -\vec{F}_{B \rightarrow A}$;
- elles ont la même droite d'action : la verticale passant par le point d'attache O.



Application :

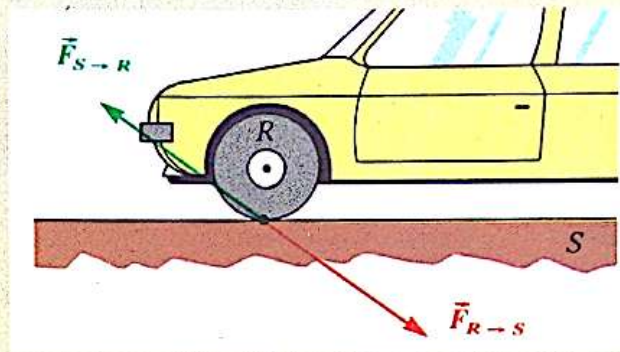
Une voiture miniature à friction est placée sur une plaque légère de polystyrène qui repose sur des crayons. Que pouvez-vous prévoir quand les roues de la voiture vont tourner? Faites l'expérience et interprétez.



Réalisons auparavant l'expérience sur le sol (S). En tournant, une roue motrice R exerce sur le sol une force $\vec{F}_{R \rightarrow S}$. D'après le Principe d'interaction, le sol exerce sur cette roue une force $\vec{F}_{S \rightarrow R}$ opposée à $\vec{F}_{R \rightarrow S}$: $\vec{F}_{R \rightarrow S} = -\vec{F}_{S \rightarrow R}$.

Ce sont les forces exercées par le sol sur les roues qui permettent au véhicule d'avancer. Notons que l'action des roues sur le sol n'est pas perceptible car la Terre ne « reculera » par de façon décelable sous l'effet de cette force!

Les résultats sont différents si la voiture est posée sur la plaque de polystyrène de masse très faible. La plaque s'avancera rapidement vers le repère, alors que la voiture s'en éloignera plus lentement.

**16.3 principe des fusées**

Jean (J), à nouveau sur des patins à roulettes, lance horizontalement un médecine-ball (M) (fig. 7). Lors de l'interaction ($J \leftrightarrow M$) les deux corps sont mis en mouvement.

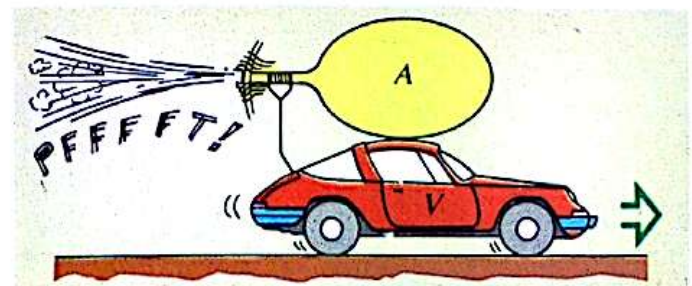
Un ballon en baudruche bien gonflé est fixé sur le toit d'une voiture jouet (fig. 8). En s'échappant, l'air comprimé (A) propulse la voiture (V) dans l'autre sens. Lors de l'interaction ($A \leftrightarrow V$), l'air et la voiture sont mis en mouvement.

Une fusée emporte son combustible et son comburant (l'ensemble étant appelé propergol, voir document) au-delà de l'atmosphère. Lors de leur combustion, la fusée (F) expulse les gaz brûlés (G) vers l'arrière à très grande vitesse par rapport à la fusée (2 à 4 km/s). Il y a interaction ($F \leftrightarrow G$) : les gaz exercent ainsi une force (appelée une « poussée ») sur la fusée, qui la propulse vers l'avant.

Nous reviendrons sur ce sujet au chapitre 19.



7. Lorsque Jean lance son médecine-ball vers l'avant, il est propulsé vers l'arrière.



8. Lorsque l'air s'échappe du ballon, la voiture est propulsée vers l'avant.

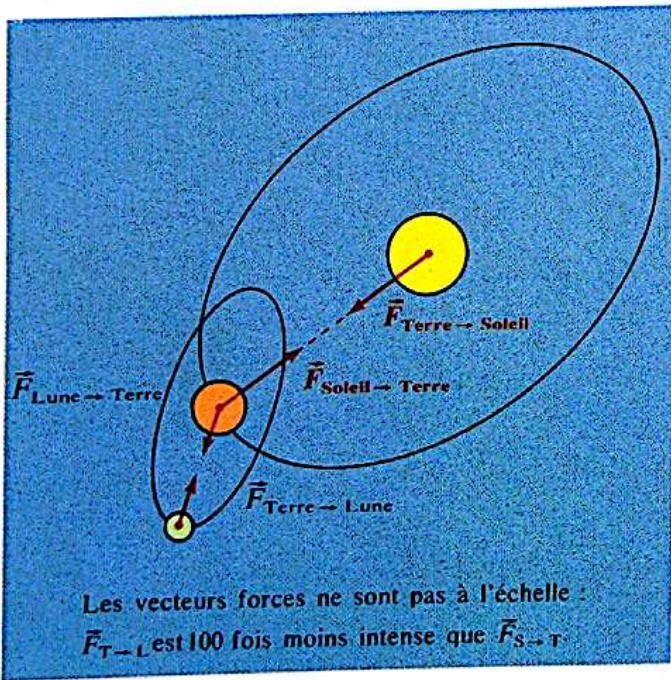
Les forces gravitationnelles

Le savant anglais Isaac Newton cherchant à interpréter le mouvement de la Lune autour de la Terre fut amené à penser que la Terre devait exercer sur la Lune une force d'attraction à distance. La légende raconte que cette pensée lui vint en voyant tomber une pomme. Afin d'interpréter les lois des mouvements des planètes découvertes et établies par Képler, Newton publia en 1687 sa théorie de l'attraction universelle.

Deux corps de masse m_1 et m_2 s'attirent; l'intensité des forces d'interaction augmente avec les masses m_1 et m_2 et diminue lorsque la distance qui sépare les deux objets augmente. Ces forces gravitationnelles obéissent au principe d'interaction.

Grâce à des appareils très sensibles, les phénomènes d'attraction universelle ont pu être observés et mesurés au laboratoire entre des corps de masses voisines (quelques kilogrammes). Les premières expériences de cette nature ont été réalisées par Cavendish.

Lorsqu'un corps est placé à la surface de la Terre, et plus généralement au voisinage d'un astre, il est soumis à une force d'attraction gravitationnelle que l'on a évoqué dans le chapitre 15 en définissant la pesanteur. Si la Terre attire un objet, inversement l'objet attire la Terre, mais l'effet de cette attraction est insensible!



Isaac Newton (1642-1727). Mathématicien et physicien de génie, il est le fondateur de la Mécanique classique appelée souvent Mécanique newtonienne.

Entre les astres de grande masse, les forces gravitationnelles sont considérables. Elles sont responsables du mouvement des planètes autour du Soleil.

L'énoncé mathématique de la loi de Newton est le suivant :

« Les forces d'attraction d'intensités égales et de sens opposés qui s'exercent entre deux masses ponctuelles placées en A et B sont :

- portées par la droite AB;
 - proportionnelles à chacune des masses;
 - inversement proportionnelles au carré de la distance $d=AB$.
- L'intensité de chacune de ces forces est donnée par la relation :

$$f_{A \rightarrow B} = f_{B \rightarrow A} = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{m_A \cdot m_B}{d^2}$$

avec m_A, m_B en kilogrammes, d en mètres et f en newtons.

Calculons l'intensité des forces gravitationnelles s'exerçant :

1/ entre le Soleil et Jupiter

$$m_S = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}; m_J = 1,9 \cdot 10^{27} \text{ kg}; d = 7,78 \cdot 10^{11} \text{ m.}$$

$$f_{S \rightarrow J} = f_{J \rightarrow S} = 6,67 \cdot 10^{-11} \times \frac{2 \cdot 10^{30} \times 1,9 \cdot 10^{27}}{(7,78 \cdot 10^{11})^2} = 4,2 \cdot 10^{23} \text{ N.}$$

Ces forces sont considérables.

2/ entre l'électron et son noyau dans un atome d'hydrogène

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}; m_n = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}; d = 0,053 \text{ nm.}$$

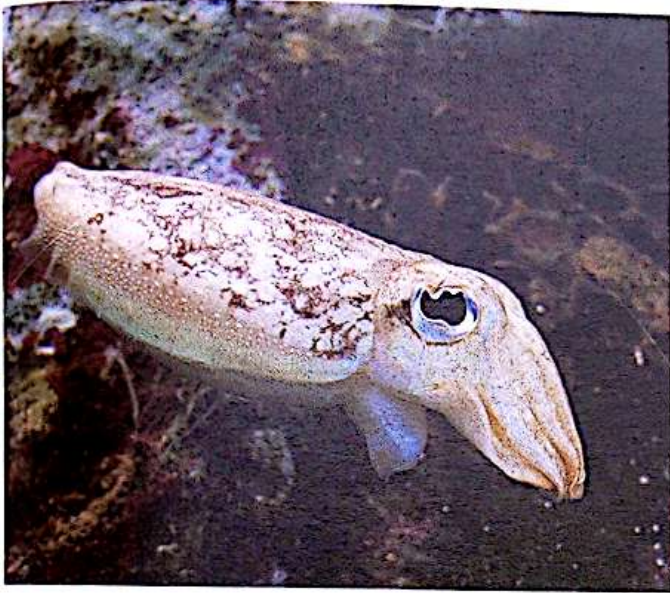
$$f_{e \rightarrow n} = f_{n \rightarrow e} = 6,67 \cdot 10^{-11} \times \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \times 1,67 \cdot 10^{-27}}{(0,053 \cdot 10^{-9})^2} = 3,6 \cdot 10^{-47} \text{ N.}$$

Ces forces sont très faibles.

interactions	distance entre les centres (m)	masse m_1 (kg)	masse m_2 (kg)	$F_{1 \rightarrow 2} = F_{2 \rightarrow 1}$ (N)
Terre ↔ Soleil	1,5 · 10 ¹¹	6 · 10 ²⁴	2 · 10 ³⁰	3,5 · 10 ²²
Lune ↔ Terre	3,8 · 10 ⁸	7 · 10 ²²	6 · 10 ²⁴	2 · 10 ²⁰
Juliette ↔ Terre	6,4 · 10 ⁶	50	6 · 10 ²⁴	490
Juliette ↔ Roméo	1	50	70	2,5 · 10 ⁻⁷

S'arracher à la Terre

Seiches, coquilles Saint-Jacques... se propulsent de façon analogue à la fusée, c'est-à-dire par *réaction*. Dans chacun de ces exemples (et ceux étudiés au paragraphe 16.3), de la matière est éjectée dans un sens, et l'objet est mis en mouvement en sens inverse; d'après le principe d'interaction, à toute action correspond une réaction de même intensité et de sens opposé.



Pour fonctionner, un moteur classique à combustion (automobile, avion) a besoin de *carburant* (essence, kérosène, ...) et de l'oxygène de l'air (*comburant*). Au-delà de l'atmosphère il n'y a plus d'air et une fusée a besoin d'emporter, outre son carburant, son comburant (par exemple, de l'oxygène liquide). On appelle *propergol* l'ensemble carburant-comburant, qui permet à la fusée d'être autonome. Citons les plus importants :

- kérosène associé à oxygène liquide (Vostok, 1^{er} et 2^e étage);
- UDMH associé au peroxyde d'azote (Ariane, 1^{er} et 2^e étage);
- hydrogène liquide associé à l'oxygène liquide (Ariane, 3^e étage et Navette spatiale).

Un moteur-fusée comprend :

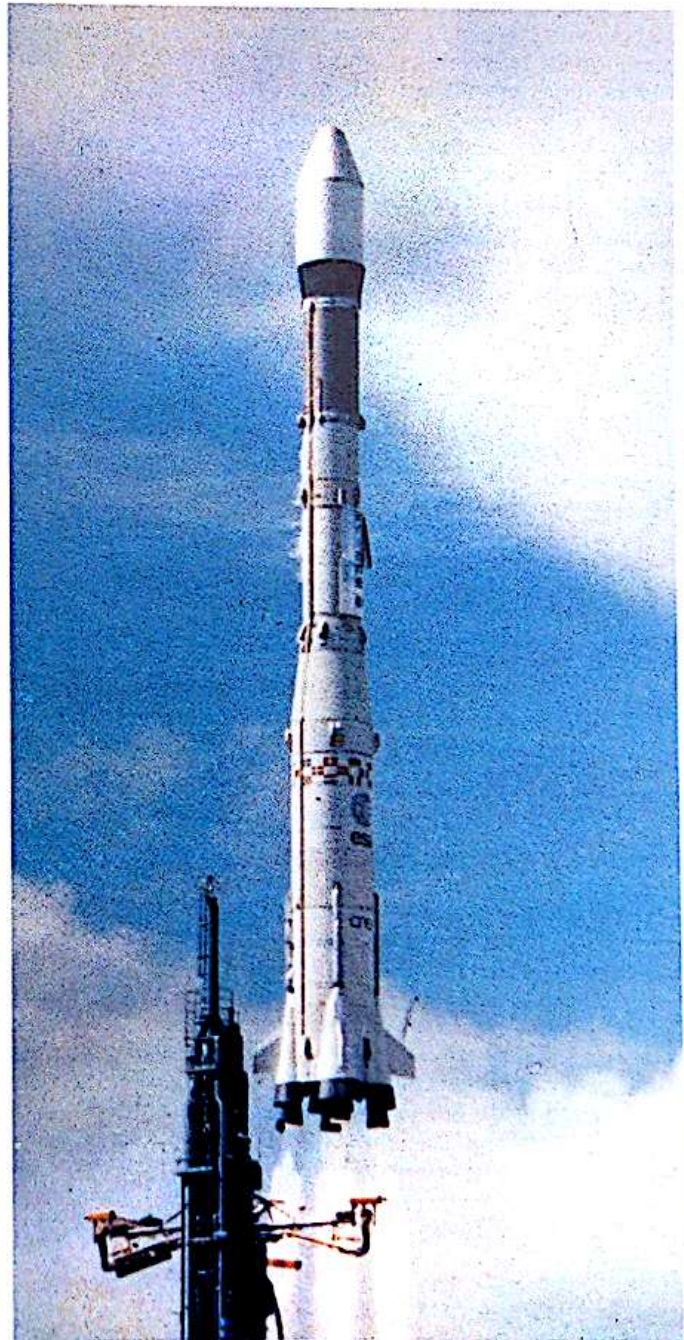
- 2 réservoirs, l'un pour le carburant, l'autre pour le comburant;
- 2 circuits alimentant le moteur avec un mélange de ces liquides;
- la chambre de combustion d'où les gaz issus de la combustion s'échappent à grande vitesse par une tuyère évasée.

Au départ, la fusée est très lourde. Aussi la cloisonne-t-on en étages. Par exemple, au bout de 143 secondes, la fusée Ariane a consommé 144 tonnes de propergol! Les réservoirs de son premier étage sont vides et sont largués dans l'espace (pour alléger la fusée) tandis que le deuxième étage est mis à feu, et ainsi de suite. Les lanceurs actuels comportent 3 étages. Il leur faut environ 15 minutes pour sortir de l'atmosphère et atteindre une vitesse (environ $30\,000 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) qui permettra de mettre en orbite un ou plusieurs satellites.

Les principales bases de lancement sont : Baïkonour en U.R.S.S., Cap Kennedy aux U.S.A., Kourou en Guyane, et destiné aux lanceurs européens, Schuang Cheng Tse en Chine.

Une fusée assure sa propulsion en éjectant vers l'arrière une partie de la matière qu'elle contient. On obtient par combustion à la fois la matière à éjecter (gaz) et l'énergie nécessaire pour que la vitesse d'éjection soit importante. La poussée sera d'autant plus grande que le débit des gaz et leur vitesse d'éjection seront grands. Ce débit peut atteindre plusieurs tonnes par seconde!

◀ *Seiches et fusées se propulsent de façon analogue... L'éjection de matière dans un sens (de l'eau pour les premières, des gaz brûlés pour les secondes) entraîne la mise en mouvement en sens inverse.*



Départ de la fusée Ariane.

Faire le point

- Énoncer le Principe d'interaction.
- Correspond-il une réaction à la force gravitationnelle exercée par la Terre sur la Lune?

16.1 Vrai ou faux?

a/ Si les muscles du nageur lui permettent de brasser l'eau, c'est l'action de l'eau sur le nageur qui le fait avancer.

b/ Si le moteur provoque bien la rotation de l'hélice, c'est l'action de l'air sur l'hélice qui propulse un ULM.

c/ Les efforts du cycliste permettent de faire tourner la roue de la bicyclette, ... mais c'est l'action de la route sur la roue motrice qui fait avancer l'ensemble.

16.2 Commenter l'affirmation : Ce n'est pas le poids du personnage qui provoque, lorsqu'il s'assoie, l'effondrement de la chaise.



16.3 Une personne tire fortement sur une corde dont l'une des extrémités est accrochée à un mur. Faire un bilan des actions. Quel incident peut mettre en évidence l'action de la corde sur l'individu?

16.4 Un bateau est immobile sur l'eau. Faire une analyse des actions subies par le bateau. Le bateau exerce-t-il une action sur l'eau? Le bateau étant immobile, on peut admettre que le poids et les actions de l'eau sur la coque se compensent. Comment représenter l'action globale de l'eau sur la coque?

16.5 Schématiser un personnage qui se déplace en marchant. Quelles sont les actions mécaniques qui s'exercent sur le marcheur? Représenter par des vecteurs forces l'action du sol sur ses pieds. Qu'en est-il si le sol est parfaitement lisse? Les forces de frottement vous paraissent-elles indispensables au marcheur? Parmi toutes les forces appliquées au marcheur, quelles sont celles qui favorisent son déplacement, vers l'avant?

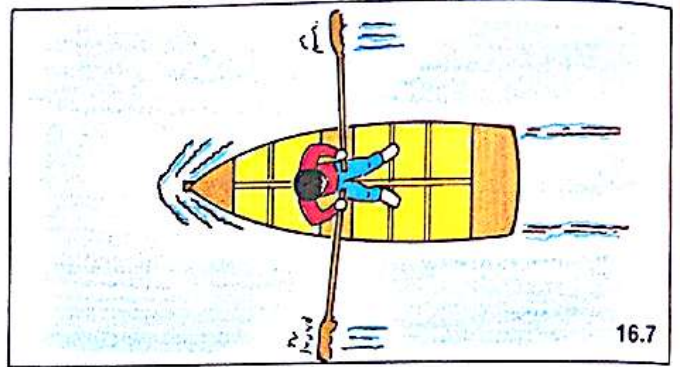
16.6 En vous servant du Principe d'interaction, expliquer les mouvements suivants :

- a/ le déplacement d'une automobile sur le sol;
- b/ la propulsion d'un ballon vers l'avant tandis que de l'air s'échappe vers l'arrière;

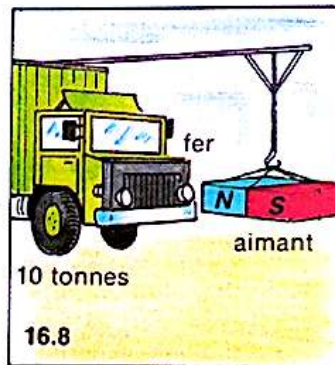
c/ le déplacement d'un avion à hélice;

d/ le déplacement d'un poulpe dans l'eau sachant qu'il se déplace par réaction.

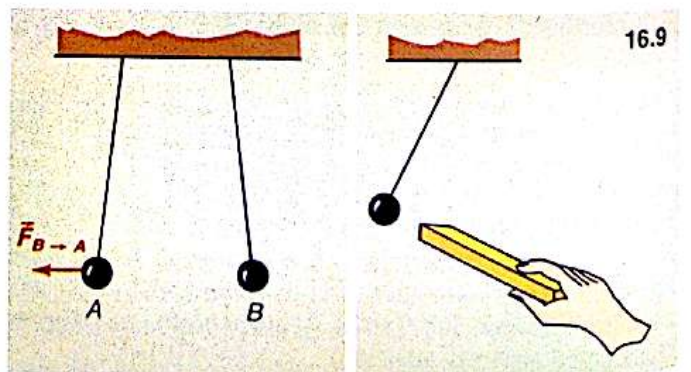
16.7 Pour faire avancer un bateau à l'aide de rames, il faut déplacer de l'eau vers l'arrière. Ramer c'est en fait exercer, avec chaque rame, une force \vec{F} sur l'eau. La barque se met-elle en mouvement sous l'action de ces forces ou sous l'action d'autres forces? Préciser sur le schéma ci-après le sens des forces qui permettent de faire avancer le bateau.



16.8 Un élève zélé propose les deux solutions ci-après pour faire avancer un camion et un voilier. Expliquer pourquoi ces projets s'avèrent inefficaces?



16.9 Lorsque nous approchons l'un de l'autre deux pendules électriques porteurs de charges de même signe, il y a répulsion entre ces deux pendules. On a représenté ci-après la force électrique exercée par B sur A. Représenter $\vec{F}_{A \rightarrow B}$.



16.10 Une boule est suspendue au plafond par un fil. Représenter la force exercée par :

- la boule sur le fil;
- le fil sur la boule;

- le fil sur le plafond;
- le plafond sur le fil;
- la force de pesanteur sur la boule.

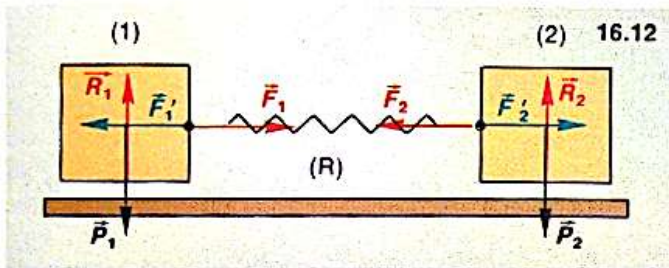
On admettra, pour la représentation, que la force exercée par la boule sur le fil est égale à la force de pesanteur exercée sur la boule.

16.11 Si nous approchons une règle électrisée d'un pendule (il suffit de frotter une règle en plexiglas sur un vêtement), ce dernier est attiré. Puis, lorsque la boule touche la règle, elle est violemment repoussée; elle subit donc une force électrique $\vec{F}_{\text{règle} \rightarrow \text{boule}}$. La règle subit-elle une action de la part de la boule? Pourquoi n'est-elle pas perceptible?

16.12 Deux palets sur coussin d'air reliés par un ressort oscillent dans un plan horizontal. Sur le schéma ci-après, on a représenté différentes forces.

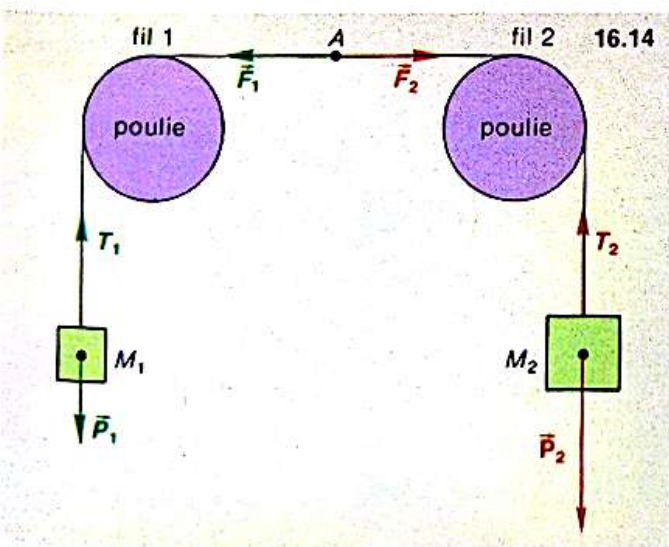
1/ Indiquer pour chacune d'elles le type de force et le corps sur lequel elles s'exercent.

2/ Quelles sont, parmi les forces représentées, celles qui obéissent au Principe d'interaction?



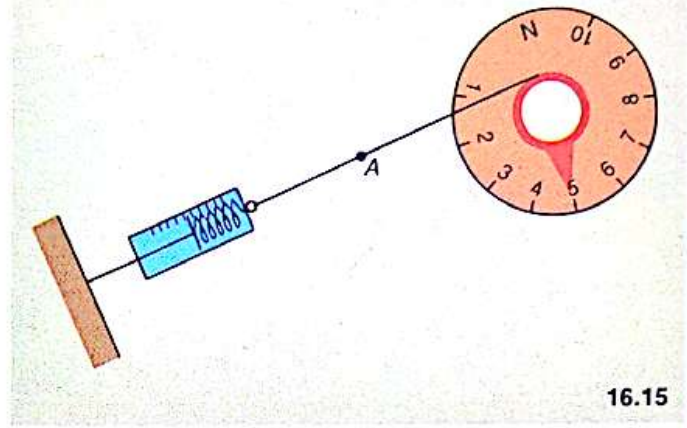
16.13 L'une des extrémités d'un dynamomètre est reliée à un point fixe; sur l'autre extrémité, on tire avec la main. Le dynamomètre indique 8 N. Représenter la force $\vec{F}_{\text{main} \rightarrow \text{dynamomètre}}$ et la force $\vec{F}_{\text{dynamomètre} \rightarrow \text{main}}$.

16.14 Deux masses, M_1 et M_2 , attachées à deux fils reliés entre eux au point A, sont disposées comme sur le schéma ci-dessous. Le système abandonné à lui-même se met en mouvement.



- 1/ Dans quel sens a lieu le mouvement?
- 2/ Quelles sont les forces qui, d'après le Principe d'interaction, sont égales en intensité?

16.15 Deux dynamomètres sont accrochés l'un à l'autre en un point A comme indiqué ci-dessous. L'un d'eux indique 5 N. A l'aide du Principe d'interaction, montrer que l'autre dynamomètre indique aussi 5 N.



16.16 Deux enfants tirent sur une corde; leurs actions se compensent. On coupe la corde et on intercale à l'endroit de la coupure un dynamomètre lié aux deux extrémités. Les deux enfants exercent à nouveau la même action. Le dynamomètre indique 300 N. Un observateur dit que chaque enfant exerce une force de 150 N, alors qu'un autre dit que chaque enfant exerce une force de 300 N. Lequel des deux a tort? Pourquoi?

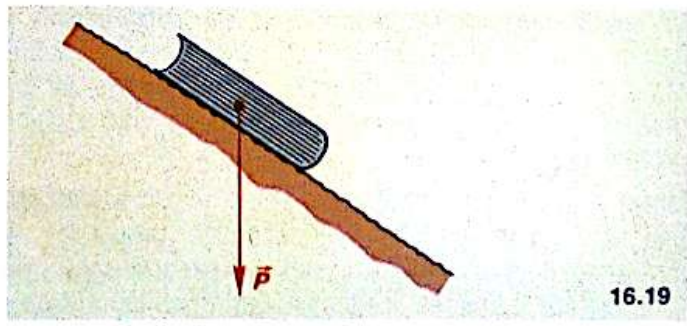
16.17 Placé entre une automobile et une caravane tractée, un dynamomètre indique 1000 N au cours d'un démarrage. Représenter sur des figures différentes :

- a/ la force exercée par le dynamomètre sur la caravane et la force exercée par le dynamomètre sur l'automobile;
- b/ les forces qui s'appliquent sur l'automobile;
- c/ les forces qui s'appliquent sur la caravane.

16.18 Une boule de poids 10 N repose sur un sol horizontal.

- 1/ Représenter les forces qui s'exercent sur la boule.
- 2/ La force qu'applique le sol sur la boule est une force verticale dirigée vers le haut, d'intensité 10 N et appliquée au point de contact (boule-sol). Représenter la force qu'exerce la boule sur le sol.

16.19 Sur un plan incliné rugueux, un livre est posé. Il reste immobile et ne glisse pas; cela est dû à l'existence de forces de frottement. Les forces de contact du sol sur le livre sont équivalentes à une force directement opposée au poids du livre, et donc non orthogonale au plan. Représenter la force équivalente aux actions qu'exerce le livre sur le plan.



Mise en évidence expérimentale du centre d'inertie d'un solide

17.1 introduction

D'Aristote (384-322 av. J.-C.) à Galilée (1564-1642), soit pendant vingt siècles, la mécanique n'a fait aucun progrès. Elle apparaissait très complexe. Les forces de frottement et l'attraction permanente de la Terre sur les corps masquaient ses lois, même les plus simples.

Galilée énonça le premier qu'un mouvement d'un solide sur un plan horizontal non rugueux n'a pas besoin d'une force pour se perpétuer (fig. 1); la force n'est là que pour vaincre les frottements : s'il n'y a pas de frottement, il n'y a pas besoin de force. La théorie d'Aristote, selon laquelle un mouvement a besoin d'une force pour se produire à vitesse constante, était mise en défaut.

Une première loi de la mécanique était née; à partir de là, Newton (1642-1727) édifia toute la mécanique dite « classique ».

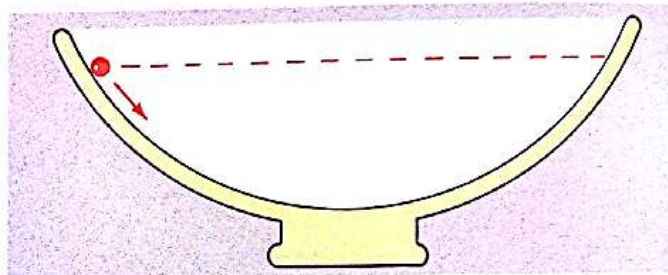
Dans ce chapitre et ceux qui suivent, nous tenterons de préciser un certain nombre de principes et de relations entre les forces et les mouvements des corps solides.

17.2 centre d'inertie d'un solide

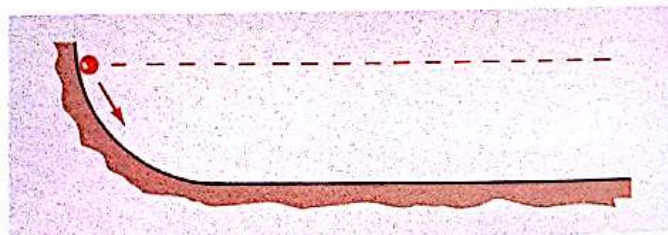
Lorsqu'un mobile évolue sur coussin d'air, les forces de frottement sont considérablement réduites (cf. chapitre 15). Sur une table à coussin d'air horizontale, le poids du mobile est compensé par les actions de l'air sur la surface inférieure de ce mobile; tout se passe comme si le mobile n'était soumis à aucune action mécanique. On dit qu'il est *pseudo-isolé* (photo 2).

Un solide serait mécaniquement isolé s'il n'était soumis à aucune action mécanique. Dans la pratique, cela n'est pas réalisable; il s'agit d'un cas limite, idéal envisagé par les physiciens pour simplifier les données de certains problèmes.

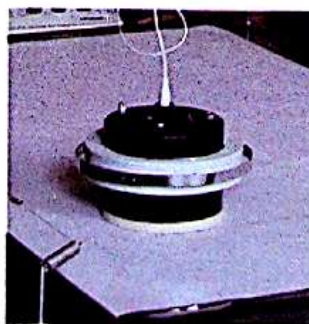
Observons un palet triangulaire lancé en tournoyant sur une table à coussin d'air horizontale (photo 3): le mouvement d'ensemble du mobile pseudo-isolé, qui tourne sur lui-même, s'effectue selon une ligne droite.



1a. La bille remontera quasiment à la même hauteur.

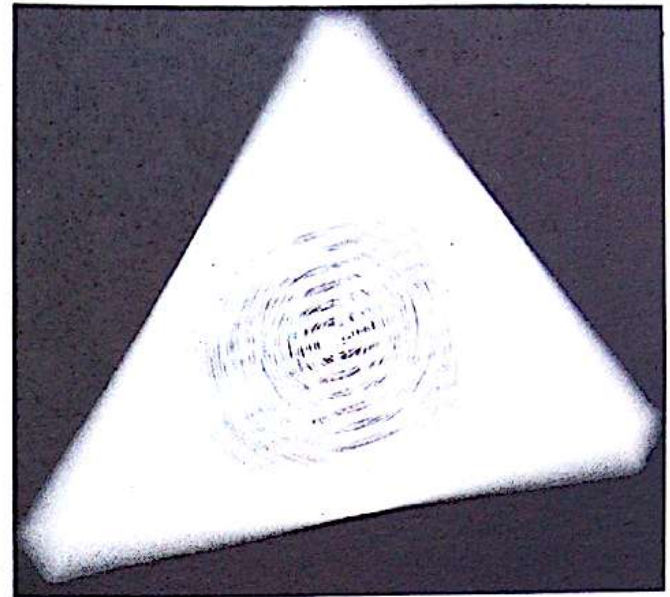
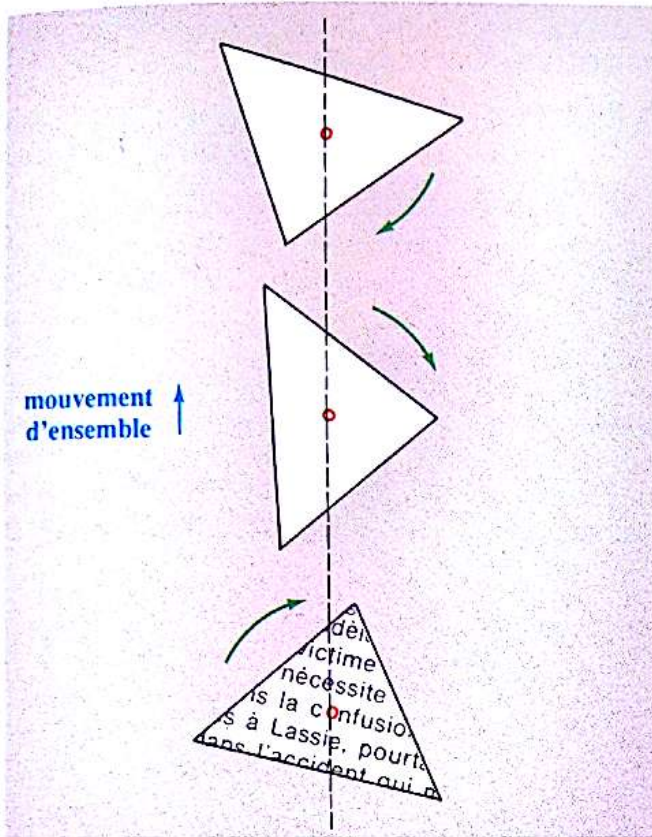


1b. Où la bille va-t-elle s'arrêter? Galilée émet l'hypothèse qu'en absence de frottement, la bille peut continuer indéfiniment, à la même vitesse, sur le plan horizontal (*).



2. Un palet évoluant sur une table à coussin d'air constitue un solide pseudo-isolé.

(*) En fait, il y a toujours des frottements. Ils ont notamment pour effet de permettre à la bille de rouler sans glisser (sans eux, la bille glisserait sans rouler!).



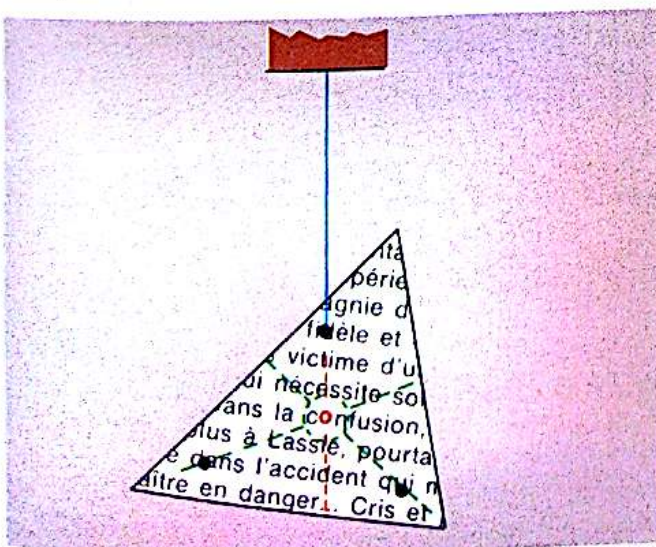
3. Le palet triangulaire tourne sur lui-même autour d'un point qui se déplace en ligne droite. On voit bien sur la chronophotographie ci-dessus, qui suit le mouvement du palet, les lettres qui tournent autour de la lettre o...qui tourne sur elle-même...

Du texte collé sur le palet, seul un petit groupe de lettres semble tourner sur lui-même tout en se déplaçant en ligne droite.

Le centre de ce groupe de lettres privilégiées coïncide avec un point particulier du solide appelé centre d'inertie. La fiche expérimentale 1 (page 170) et la figure 4 nous montrent que le centre d'inertie et le centre de gravité d'un solide coïncident. Nous noterons G ce point commun.

L'étude expérimentale permet également de préciser le mouvement de ce point :

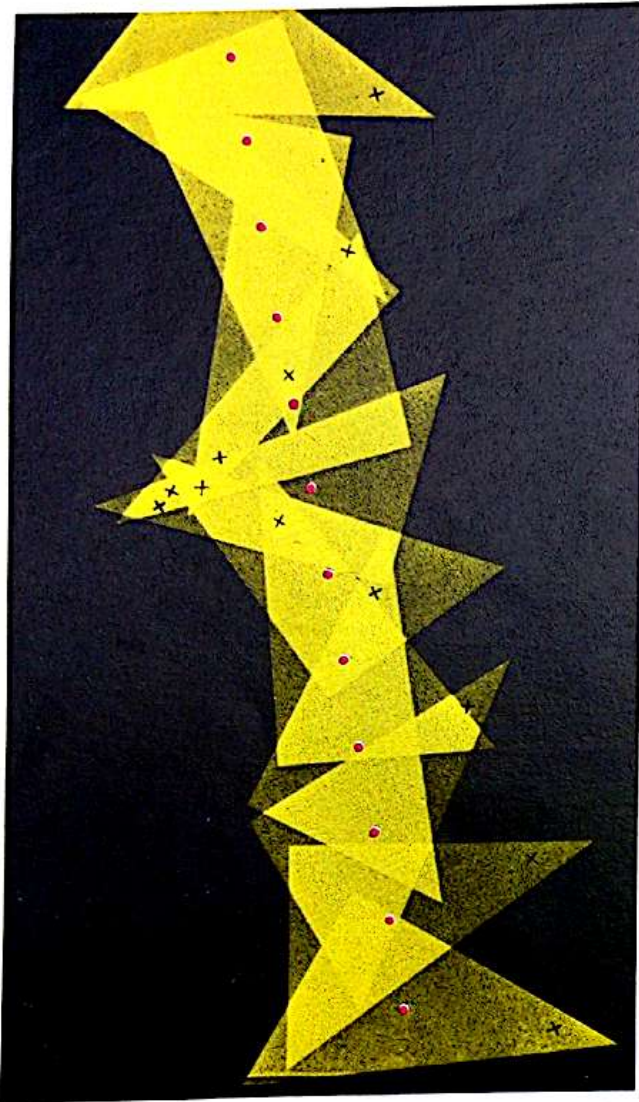
- Le mouvement par rapport à un référentiel terrestre du centre d'inertie d'un solide pseudo-isolé est rectiligne uniforme. Le vecteur vitesse \vec{v}_G de son centre d'inertie G est constant au cours du mouvement.



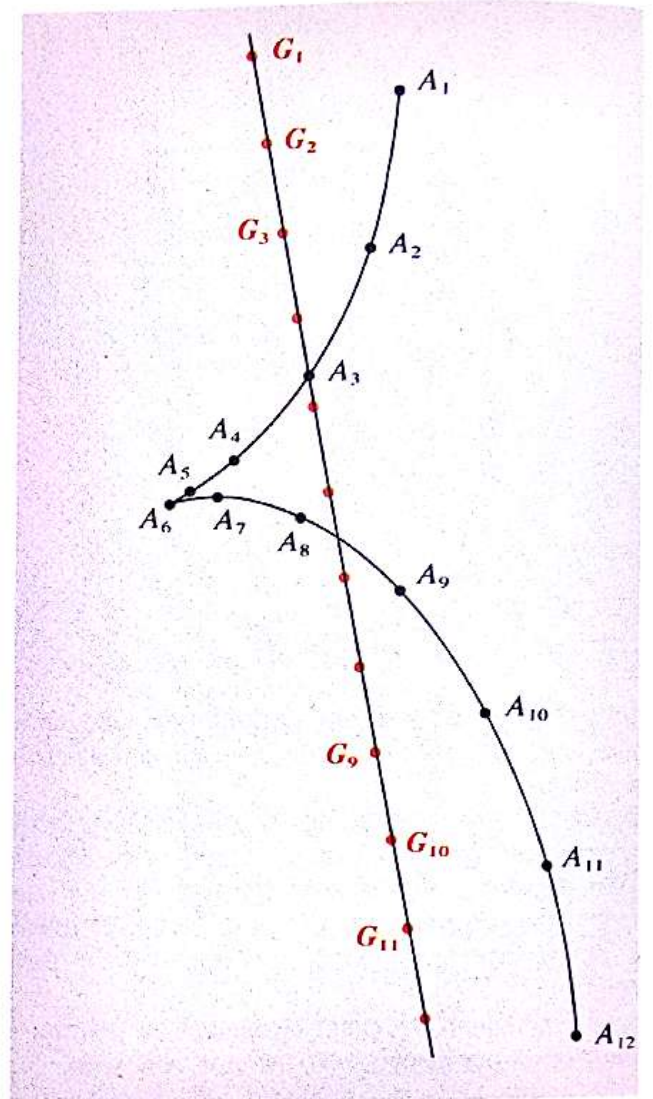
4. Quel que soit le point d'attache, la direction verticale du fil tendu passe par le centre de gravité de la plaque, qui est confondu avec le centre d'inertie.

Fiche expérimentale 1

mouvement du centre d'inertie d'un solide pseudo-isolé



Une plaque triangulaire dont on a précédemment déterminé le centre de gravité (point rouge) est lancée sur une table à coussin d'air; cette plaque est pseudo-isolée. Une fois lancée, elle est photographiée à des intervalles de temps τ égaux. Le point noir A , quelconque, a un mouvement curviligne. Le point rouge G a une trajectoire rectiligne.



De plus on constate que $G_1G_2 = G_2G_3 = G_3G_4 = \dots$. Le mouvement de G est *rectiligne uniforme*; G parcourt des distances égales pendant des durées τ égales. Le centre de gravité de la plaque, solide pseudo-isolé, est animé d'un mouvement rectiligne uniforme. Il est appelé « centre d'inertie » de la plaque.

17.3 principe de l'inertie

L'étude expérimentale conduit ainsi à particulariser un point du solide, que nous avons appelé *centre d'inertie* et noté G .

Plus généralement, nous admettrons que tout système matériel (déformable ou non), possède un centre d'inertie.

Quelle est la particularité de ce point?

La réponse est suggérée par les expériences précédentes et connue sous le nom de **Principe de l'inertie** :

- Le mouvement du centre d'inertie de tout système isolé (ou pseudo-isolé) est rectiligne uniforme.

Ce principe ne peut être vérifié directement par l'expérience de façon rigoureuse du fait même qu'il n'est jamais possible d'isoler totalement un système. En fait, le Principe de l'inertie n'est qu'un cas particulier d'un principe plus général : le Principe fondamental de la dynamique (que vous étudierez en classe terminale), et dont les conséquences sont vérifiées avec une excellente précision (l'étude du lancement des satellites et des sondes spatiales, l'explication du mouvement des astres et des marées s'appuient sur ce principe fondamental).

Remarque : En fait, le Principe de l'inertie pose le problème des référentiels.

Si la table à coussin d'air est placée dans un autobus, le palet, tout comme les passagers, va subir de brusques à-coups; le Principe de l'inertie n'est généralement pas vérifié dans un véhicule en mouvement quelconque.

L'énoncé complet du Principe de l'inertie est le suivant :

Il existe des référentiels dans lesquels, en toute rigueur, pour un système matériel mécaniquement isolé :

- si le centre d'inertie du système est en mouvement, alors ce mouvement est rectiligne uniforme;
- si le centre d'inertie est au repos, alors il reste au repos.

De tels référentiels sont appelés galiléens.

Le référentiel de Copernic est considéré comme galiléen. La fiche expérimentale montre que, pour des expériences courantes, le référentiel terrestre peut être considéré comme galiléen.

17.4 mouvement d'ensemble; mouvement propre

Du palet lancé sur table à coussin d'air horizontale (système pseudo-isolé), nous avons d'abord dit qu'il se déplaçait en ligne droite en tournant sur lui-même.

Le mouvement du centre d'inertie G définit le *mouvement d'ensemble* du solide : « il va en ligne droite ». Plus précisément, le mouvement d'ensemble d'un solide isolé (pseudo-isolé) est rectiligne uniforme.

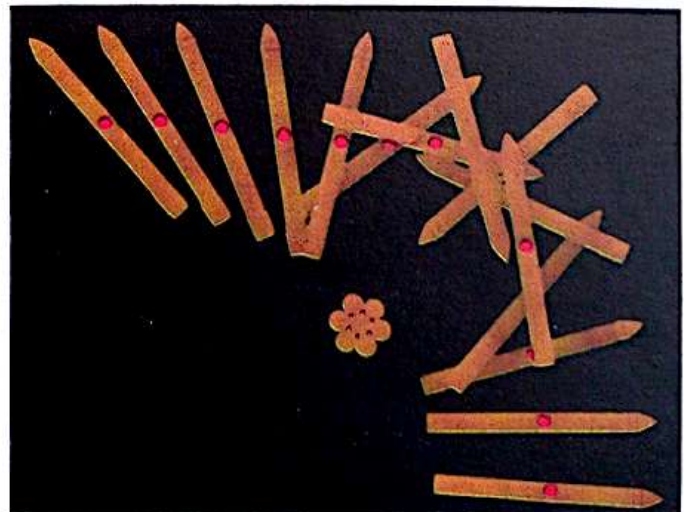
Au mouvement des autres points qui tournent autour du centre d'inertie correspond le *mouvement propre* du solide : « tournant sur lui-même ».

La seconde fiche expérimentale montre que chacun des points du mobile pseudo-isolé tourne à vitesse constante autour du point G : le mouvement propre du mobile est un mouvement de rotation uniforme autour de son centre d'inertie.

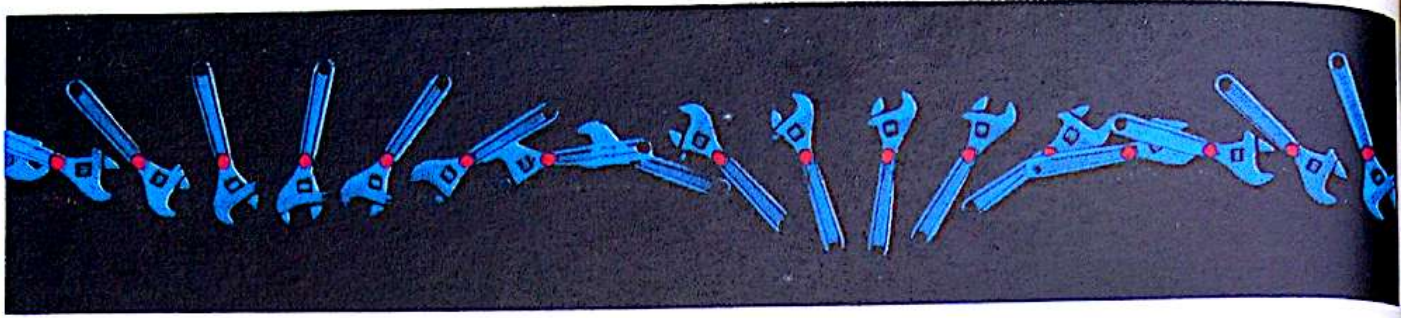
Pour placer un satellite exactement sur l'orbite prévue, les techniciens s'intéressent au mouvement d'ensemble. Par contre, les cosmonautes sont directement intéressés par le mouvement propre, et il serait bien ennuyeux pour eux que le satellite se mette à tourner rapidement sur lui-même!

En lançant avec précaution le palet sur la table à coussin d'air horizontale, on peut éviter qu'il tourne sur lui-même. Le solide est alors animé d'un mouvement de translation rectiligne uniforme; chacun de ses points a le même vecteur vitesse que le centre d'inertie.

Les photographies successives des figures 5 et 6 mettent bien en évidence le mouvement d'ensemble et le mouvement propre



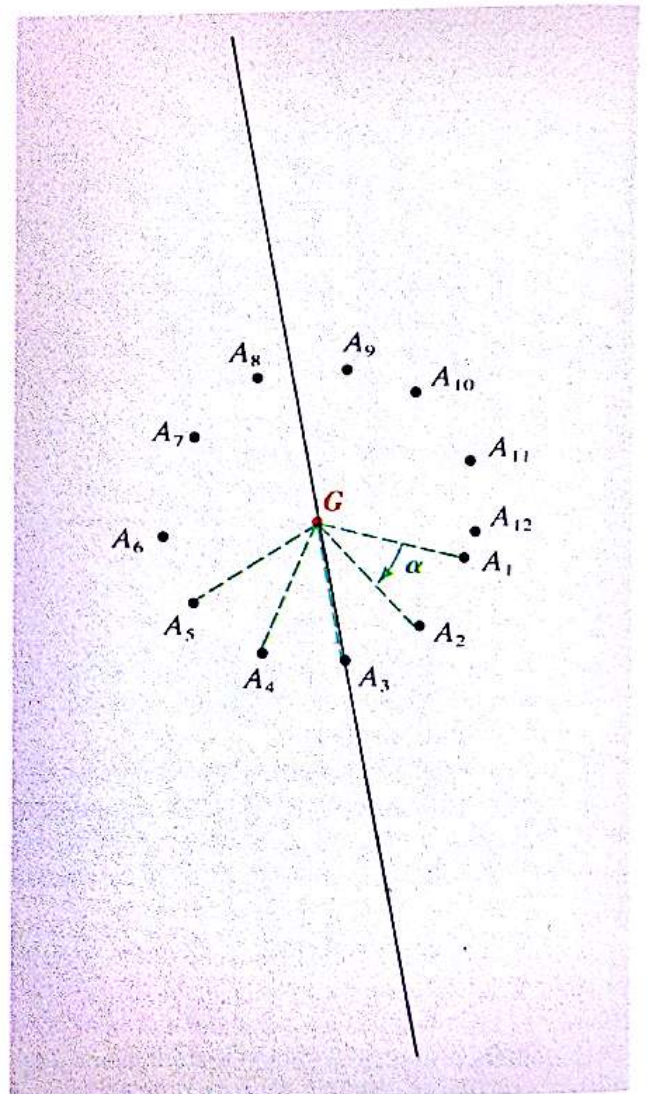
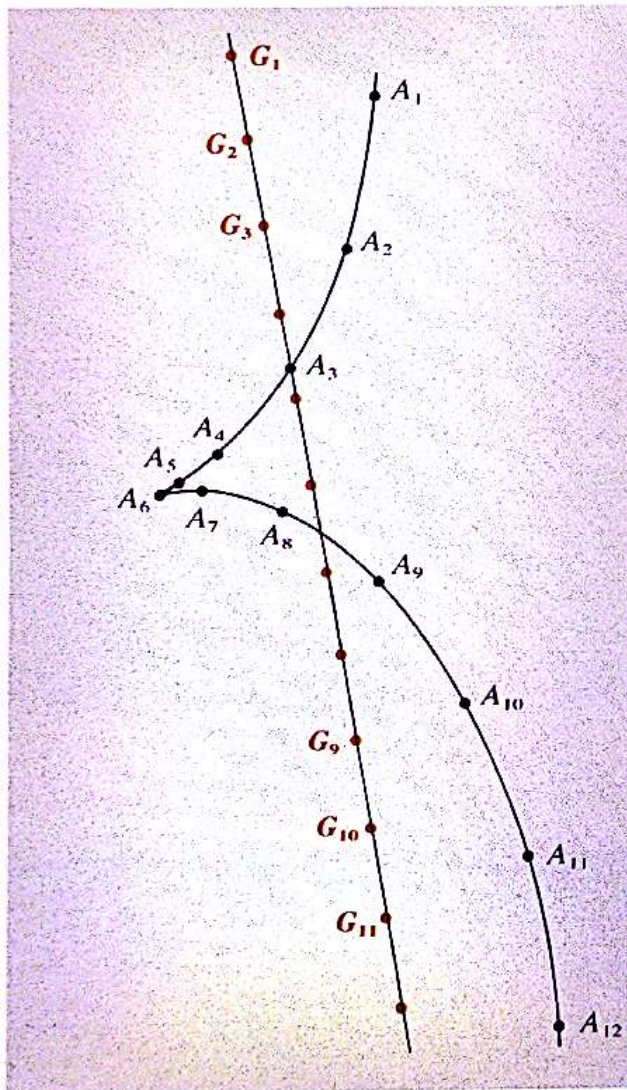
5. Ce solide en mouvement est-il pseudo-isolé?



6. La clé lancée sur la table à coussin d'air est photographiée tous les $1/30$ de seconde. Elle tourne autour du même point qui se déplace en ligne droite.

Fiche expérimentale 2

mouvement propre d'un solide pseudo-isolé



Intéressons-nous maintenant au mouvement propre de la plaque triangulaire lancée sur la table à coussin d'air horizontale. Le point A décrit une trajectoire curviligne; par rapport à la table son mouvement est varié.

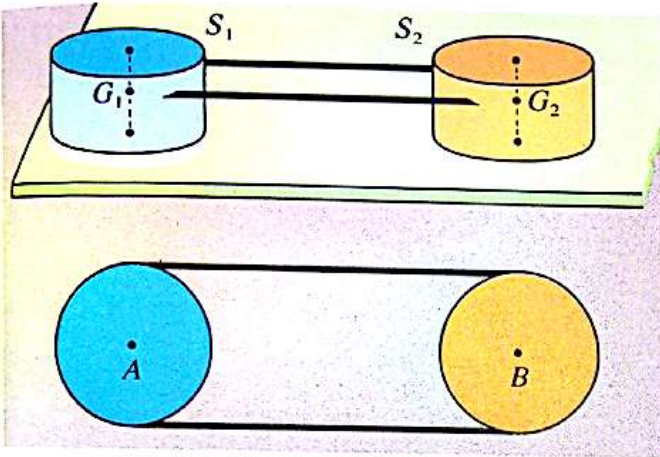
A partir du point G traçons les vecteurs $\overline{G_1A_1}$, $\overline{G_2A_2}$, $\overline{G_3A_3}$ qui donnent les positions successives du point A par rapport au centre d'inertie G .

Le point A tourne autour de G . Les angles que font deux vecteurs positions consécutifs sont égaux : le point A est animé d'un mouvement circulaire uniforme centré en G . Il en est de même de tous les autres points du solide indéformable. Le mouvement propre du solide pseudo-isolé est un mouvement de rotation uniforme autour du centre d'inertie.

Centre de masse d'un système

Première expérience : deux solides rigidement liés

Deux mobiles S_1 et S_2 , de masses m_1 et m_2 , sont liés rigidement (fig. 7) et constituent un solide S de masse $m_1 + m_2$. Connaissant les centres d'inertie G_1 et G_2 des deux solides, peut-on déterminer le centre d'inertie G du solide S ?



7. Les points marqueurs A et B permettent d'enregistrer les trajectoires de G_1 et G_2 . G , le centre d'inertie de l'ensemble, n'est pas muni d'un marqueur. Comment déterminer sa trajectoire?

S est lancé sur une table à coussin d'air horizontale. Des marqueurs A et B situés à la verticale des centres d'inertie G_1 et G_2 permettent d'enregistrer sur la table les positions de ces points à intervalles de temps consécutifs égaux. Nous pouvons alors reconstituer des trajectoires identiques à celles de G_1 et G_2 (fig. 8).

Le système étant pseudo-isolé, durant l'enregistrement la trajectoire du centre d'inertie G de l'ensemble S des deux solides est rectiligne; il convient de situer la droite Δ décrite par ce point. Lors du mouvement, G_1 tourne autour de G ; la distance $d_1 = GG_1$ est constante. G_1 ne peut donc s'éloigner de part et d'autre de la droite Δ d'une distance supérieure à d_1 . La trajectoire curviligne de G_1 est donc inscrite dans une bande centrée sur Δ et de largeur $2d_1$. De même, la trajectoire de G_2 est inscrite dans une bande de largeur $2d_2 = 2GG_2$. La trajectoire Δ de G est donc la médiatrice commune aux deux bandes.

Au cours d'une expérience, nous avons obtenu pour un rapport des masses m_2/m_1 : $2d_1 = 6$ cm, $2d_2 = 3$ cm, soit $2d_1/2d_2 = 2$. D'autres expériences confirment le résultat suivant :

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{2d_1}{2d_2} = \frac{GG_1}{GG_2},$$

$$\text{soit } m_1 \cdot GG_1 = m_2 \cdot GG_2.$$

D'autre part, G appartient au segment G_1G_2 ; l'égalité ci-dessus se traduit donc en notation vectorielle par :

$$m_1 \cdot \overrightarrow{GG_1} = -m_2 \cdot \overrightarrow{GG_2}$$

$$m_1 \cdot \overrightarrow{GG_1} + m_2 \cdot \overrightarrow{GG_2} = \vec{0}.$$

Soit un point O quelconque de l'espace; il vient :

$$m_1 \cdot [\overrightarrow{OG_1} - \overrightarrow{OG}] + m_2 \cdot [\overrightarrow{OG_2} - \overrightarrow{OG}] = \vec{0}$$

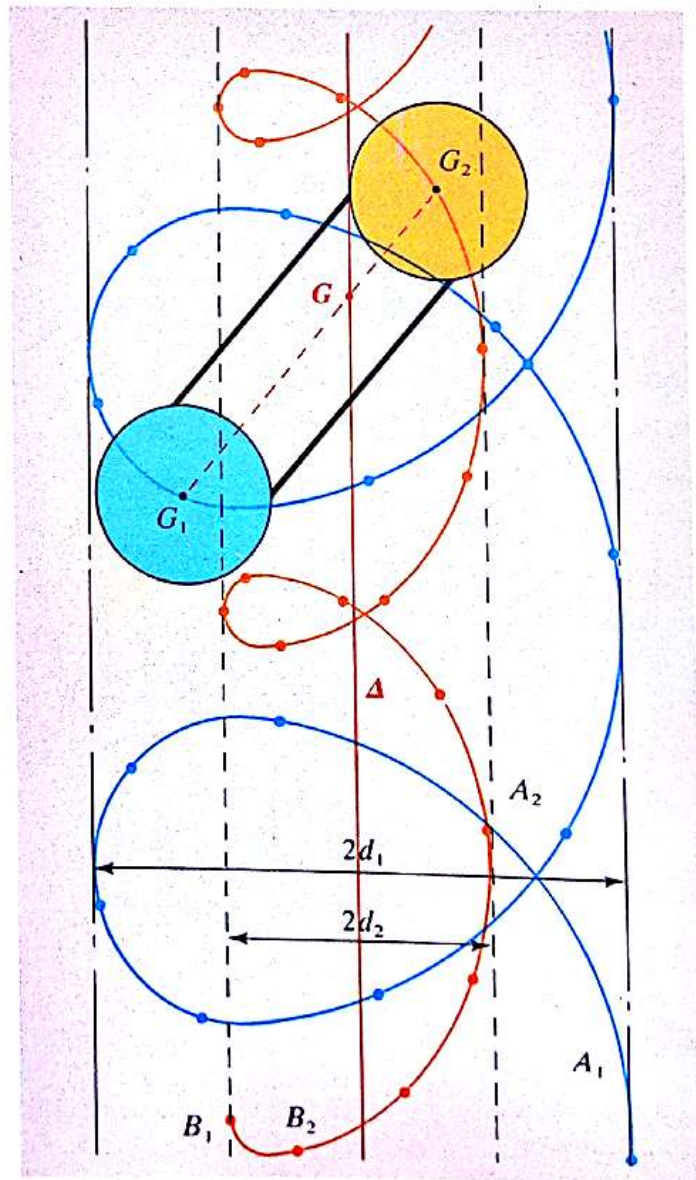
$$(m_1 + m_2) \cdot \overrightarrow{OG} = m_1 \cdot \overrightarrow{OG_1} + m_2 \cdot \overrightarrow{OG_2}.$$

G est ainsi le barycentre des points G_1 et G_2 affecté des coefficients m_1 et m_2 .

Ce résultat, obtenu pour deux solides associés, peut s'étendre à l'association d'un grand nombre de solides rigidement liés ou non; on écrit alors :

$$(m_1 + m_2 + m_3 + \dots) \cdot \overrightarrow{OG} = m_1 \cdot \overrightarrow{OG_1} + m_2 \cdot \overrightarrow{OG_2} + m_3 \cdot \overrightarrow{OG_3} + \dots$$

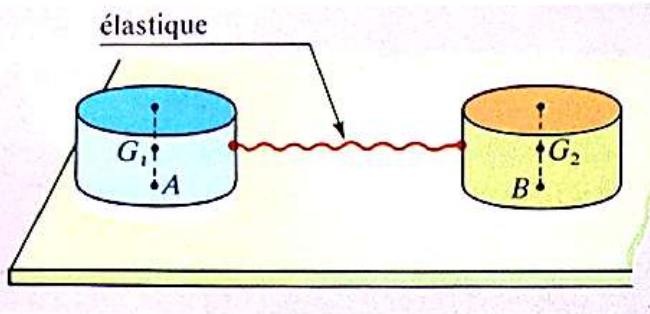
G est appelé le centre de masse de l'association; il est à la fois centre d'inertie, centre de gravité et barycentre du système.



8. L'ensemble S est un solide pseudo-isolé. La trajectoire de son centre d'inertie G est rectiligne (droite Δ). Le palet S_2 a une masse supérieure à celle du palet S_1 ; la trajectoire de son centre d'inertie G_2 s'inscrit dans une bande plus étroite.

**Seconde expérience :
deux solides reliés par un élastique**

Deux palets $S_1(m_1; G_1)$ et $S_2(m_2; G_2)$ sont reliés par un élastique de masse négligeable. L'ensemble, noté S (fig. 9), constitue un système déformable de masse $m = m_1 + m_2$. Nous avons reconstitué sur la figure 10 les trajectoires de G_1 et G_2 .



9. Ensemble de deux palets reliés par un élastique.

Étude qualitative des trajectoires

- Phase 1 : L'élastique tendu tire sur S_1 qui n'est plus pseudo-isolé; la trajectoire de G_1 est curviligne.
- Phase 2 : L'élastique est détendu, S_1 est pseudo-isolé; le mouvement de G_1 est rectiligne uniforme.
- Phase 3 : Le choc; S_2 bouscule S_1 qui n'est plus pseudo-isolé.
- Phase 4 : S_1 est à nouveau pseudo-isolé.
- Phase 5 : L'élastique tendu tire sur S_1 ; la trajectoire de G_1 s'incurve.

Nous pouvons faire les mêmes constatations concernant G_2 .

Recherche de la trajectoire de G

Admettons que la relation :

$$m_1 \cdot \overrightarrow{GG_1} + m_2 \cdot \overrightarrow{GG_2} = \vec{0},$$

vérifiée expérimentalement pour deux solides rigidement liés, est encore vraie dans ce cas. Recherchons la position C_i de G , qui correspond à chaque position A_i et B_i de G_1 et de G_2 . Déterminons par exemple C_6 . Mesurons $A_6B_6 = 5,6$ cm. G , centre d'inertie, est situé en C_6 , sur le segment A_6B_6 , tel que :

$$\frac{C_6A_6}{C_6B_6} = \frac{m_2}{m_1} = \frac{1,4}{0,7} = 2$$

soit

$$C_6A_6 = 2C_6B_6.$$

Or

$$C_6A_6 + C_6B_6 = A_6B_6,$$

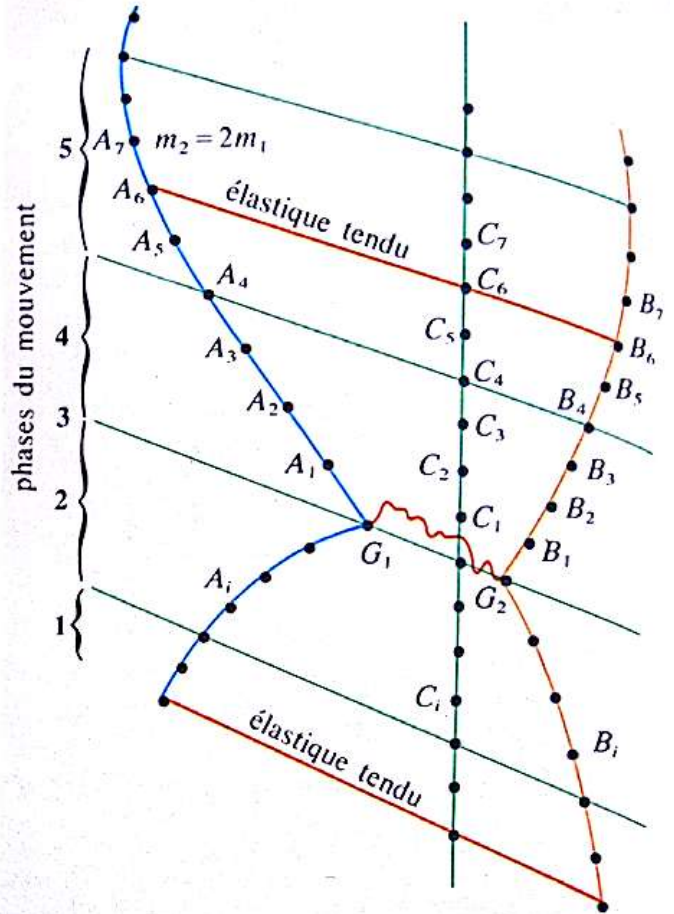
d'où :

$$3C_6B_6 = A_6B_6, \text{ et } C_6B_6 = \frac{A_6B_6}{3} = 1,9 \text{ cm.}$$

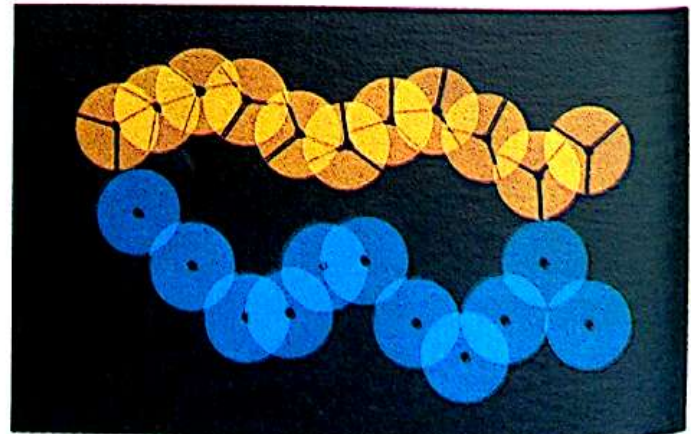
Faisons de même pour tous les points C_i . Les points C_i , qui coïncident avec les positions successives du centre d'inertie à des intervalles de temps égaux, sont alignés et équidistants; le mouvement du centre d'inertie du système est donc rectiligne uniforme. Cela est bien conforme au Principe de l'inertie.

En conclusion :

Le centre de masse d'un système de solides, centre d'inertie de ce système, est le barycentre des centres de masse de chacun des solides.



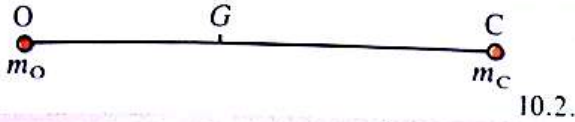
10. Trajectoires des centres d'inertie des deux solides reliés par un élastique et de celui de leur ensemble S . La courbure de la trajectoire du centre d'inertie G_2 du palet S_2 est moins importante que celle de la trajectoire de G_1 ; S_2 est plus lourd que S_1 .



Enregistrement stroboscopique du mouvement de deux palets reliés par un élastique. La masse du palet orange est supérieure à celle du palet bleu.

Application 1 :

Parmi les gaz d'échappement des véhicules, il s'en trouve un, très toxique, le monoxyde de carbone CO. La distance entre les atomes de carbone et d'oxygène dans la molécule CO est de 113 pm. Sachant que $C = 12 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ et $O = 16 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, déterminer la position du centre d'inertie de cette molécule.



En gramme, la masse d'un atome de carbone vaut $m_C = 12/N_A$ et celle d'un atome d'oxygène vaut $m_O = 16/N_A$, avec $N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$. On a donc :

$$\frac{m_O}{m_C} = \frac{16}{12} = \frac{4}{3}$$

Le centre d'inertie G de la molécule est le barycentre de $C (m_C)$ et $O (m_O)$:

$$m_O \cdot \overrightarrow{GO} + m_C \cdot \overrightarrow{GC} = \vec{0}$$

Situons G par rapport à O :

$$m_O \cdot \overrightarrow{GO} + m_C \cdot (\overrightarrow{GO} + \overrightarrow{OC}) = \vec{0}$$

$$\overrightarrow{OG} = \frac{m_C}{m_O + m_C} \cdot \overrightarrow{OC}$$

Avec $m_O = \frac{4}{3} m_C$, il vient :

$$\overrightarrow{OG} = \frac{3}{7} \cdot \overrightarrow{OC}$$

Numériquement :

$$OG = \frac{3}{7} \times 113 \approx 48 \text{ pm}$$

Le centre d'inertie de la molécule de monoxyde de carbone est situé à 48 pm de l'atome d'oxygène O et à 65 pm de l'atome de carbone C .

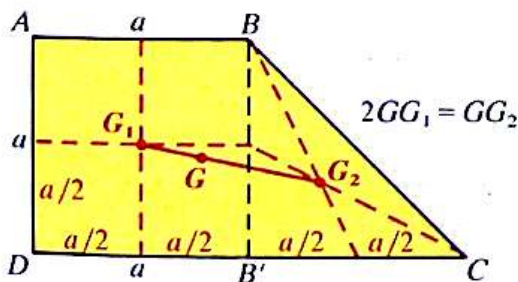
Application 2 :

Dans une plaque métallique homogène d'épaisseur constante, on découpe le trapèze schématisé ci-contre. Déterminer graphiquement la position du centre d'inertie.

Ce trapèze peut être considéré comme la juxtaposition du carré $ABB'D$ de masse m_1 , et du triangle BCB' de masse m_2 . Remarquons tout de suite que la surface du triangle est la moitié de celle du carré, d'où :

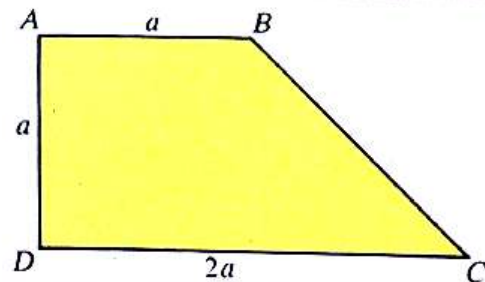
$$m_1 = 2m_2$$

Le centre d'inertie G_1 du carré est au centre de ce dernier. Le centre d'inertie G_2 du triangle est au point d'intersection des médianes.



Le centre d'inertie G de l'ensemble est le barycentre de $G_1(m_1)$ et $G_2(m_2)$:

$$m_1 \cdot \overrightarrow{GG_1} + m_2 \cdot \overrightarrow{GG_2} = \vec{0}$$



Situons G par rapport à G_1 :

$$m_1 \cdot \overrightarrow{GG_1} + m_2 \cdot (\overrightarrow{GG_1} + \overrightarrow{G_1G_2}) = \vec{0}$$

d'où :

$$(m_1 + m_2) \cdot \overrightarrow{GG_1} = -m_2 \cdot \overrightarrow{G_1G_2}$$

$$\overrightarrow{G_1G} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot \overrightarrow{G_1G_2}$$

Avec $m_1 = 2m_2$

$$\overrightarrow{G_1G} = \frac{1}{3} \overrightarrow{G_1G_2}$$

G se trouve donc au tiers du segment G_1G_2 , à partir de G_1 .

Application 3 :

Une pièce à usiner a la forme d'une équerre. Elle est découpée dans une plaque métallique homogène d'épaisseur constante. Dans un repère orthonormé, (O, \vec{i}, \vec{j}) , déterminer la position du centre d'inertie de cette pièce (l'unité de longueur est le cm).

Nous pouvons considérer cette pièce comme la juxtaposition du rectangle $OAD'E$ de masse m_1 et du carré $BCDD'$ de masse m_2 .

Notons que : $m_1 = 2m_2$.

Le centre d'inertie G_1 du rectangle a pour coordonnées :

$$\overrightarrow{OG_1} \begin{vmatrix} 0,5 \\ 1 \end{vmatrix}$$

Le centre d'inertie G_2 du carré a pour coordonnées :

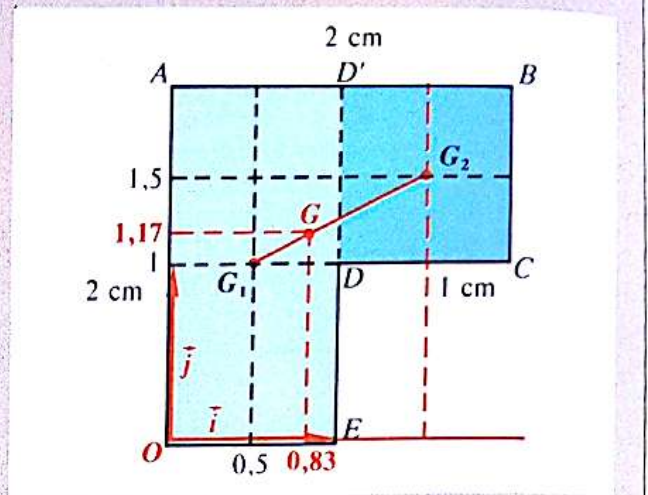
$$\overrightarrow{OG_2} \begin{vmatrix} 1,5 \\ 1,5 \end{vmatrix}$$

Le centre d'inertie G de la pièce est tel que :

$$(m_1 + m_2) \cdot \overrightarrow{OG} = m_1 \cdot \overrightarrow{OG_1} + m_2 \cdot \overrightarrow{OG_2}$$

$$3\overrightarrow{OG} = 2\overrightarrow{OG_1} + \overrightarrow{OG_2}$$

$$\overrightarrow{OG} = \frac{2}{3} \overrightarrow{OG_1} + \frac{1}{3} \overrightarrow{OG_2}.$$



D'où :

$$\overrightarrow{OG} \begin{vmatrix} \frac{2}{3} \times 0,5 + \frac{1}{3} \times 1,5 = 0,83 \\ \frac{2}{3} \times 1 + \frac{1}{3} \times 1,5 = 1,17. \end{vmatrix}$$

Les coordonnées de G sont, en cm :

$$x = 0,83 \quad \text{et} \quad y = 1,17.$$

Faire le point

- Qu'appelle-t-on solide mécaniquement isolé?
- Énoncer le Principe de l'inertie.
- Le Principe de l'inertie est-il rigoureusement ou approximativement vérifié dans le référentiel terrestre pour toutes les expériences de mécanique?
- Donner une méthode simple pour déterminer le centre de gravité d'un solide, en utilisant une propriété de son poids.

17.1 A partir du Principe de l'inertie, expliquer pourquoi :

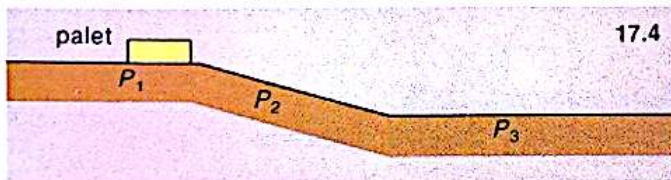
- sur une route verglacée, une automobile rate son virage et continue en ligne droite;
- il est utile d'avoir des ceintures de sécurité;
- il est difficile de se maintenir debout, sans se tenir, dans un autobus;
- un voyageur assis sur une banquette est projeté vers l'extérieur quand le conducteur aborde un virage.

17.2 Le centre d'inertie d'un palet est animé d'une vitesse de $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ sur un plan horizontal parfaitement poli. Quelle sera sa vitesse 2 s, 4 s plus tard?

17.3 Une fusée intersidérale arrive, moteurs arrêtés, dans le voisinage d'une planète.

- Quelle était la nature de son mouvement?
- Pourquoi et comment est-il modifié?

17.4 Les plans P_1 , P_2 et P_3 de la figure ci-dessous ont des surfaces parfaitement polies. Le mouvement du centre d'inertie du palet est rectiligne uniforme sur P_1 ; décrire qualitativement le mouvement du palet sur P_2 et P_3 . (Les surfaces de P_1 et de P_3 sont horizontales.)



17.5 Dans un repère de Copernic, le mouvement d'ensemble de la Terre (de son centre d'inertie) est-il rectiligne uniforme? La Terre est-elle un système isolé? Quel est son mouvement propre?

17.6 Sur la plate-forme parfaitement lisse et horizontale d'un camion est placé un petit disque plat, poli. Ce disque est situé à 2 m du rebord arrière. Le camion, animé d'un mouvement rectiligne uniforme, accroît très brutalement sa vitesse de $4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Décrire le mouvement du disque par rapport au camion. Combien de temps ce disque reste-t-il sur le camion à partir de cette brusque variation de vitesse?

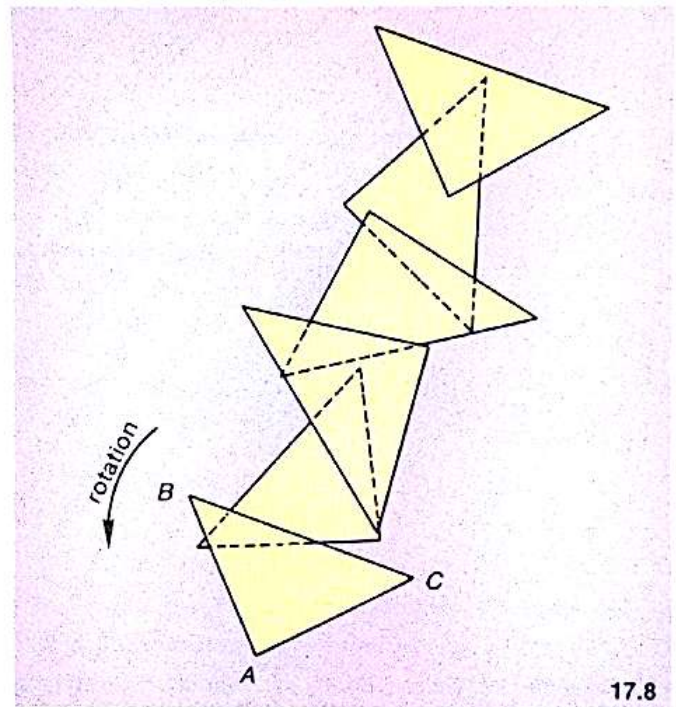
17.7 Un palet est lancé sur une table à coussin d'air horizontale. Son centre d'inertie est animé d'une vitesse de $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Les positions successives de ce point sont repérées toutes les 20 millisecondes. Représenter, grandeur nature, un enregistrement possible de ce mouvement.

17.8 Un stroboscope émet des éclairs lumineux très brefs à intervalles de temps successifs égaux à $\tau = 40 \text{ ms}$. Une photographie, prise sous éclairage stroboscopique, représente les positions prises par une plaque triangulaire à des instants régulièrement espacés.

1/ Déterminer sur la figure ci-après la trajectoire du point de concours des médianes de ce triangle. Conclure.

2/ Calculer la vitesse du centre d'inertie du palet. Échelle de représentation : $0,5 \text{ cm} \leftrightarrow 3 \text{ cm}$ de l'objet.

3/ Déterminer le mouvement du palet dans un repère lié au centre d'inertie du solide et en translation rectiligne et uniforme par rapport à un repère du laboratoire. On montrera que le mouvement du sommet A est un mouvement circulaire. On calculera la durée d'un tour.



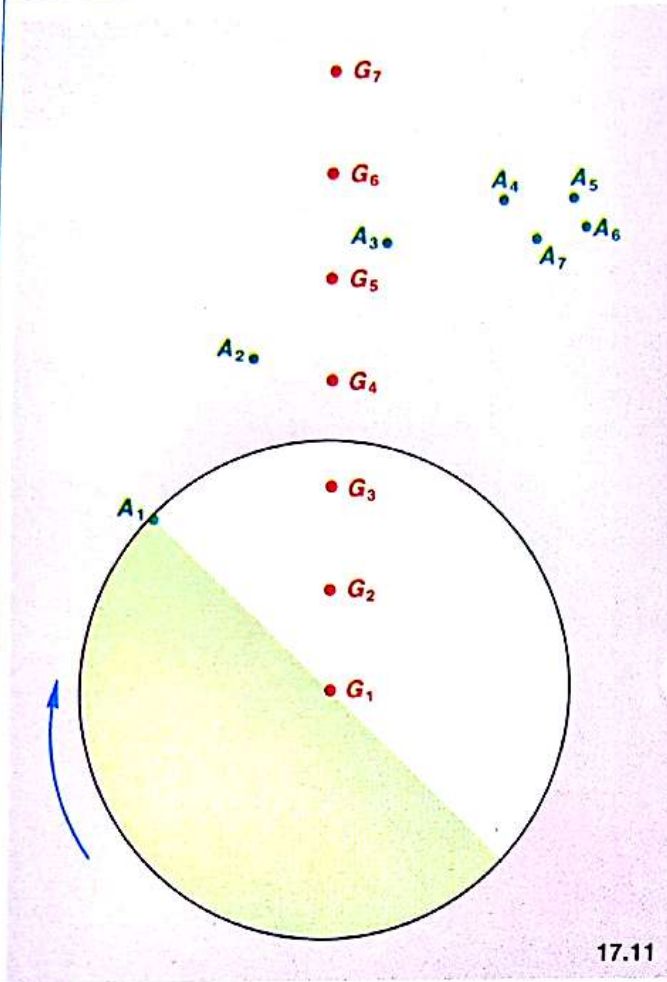
17.9 Une tige homogène AB de 10 cm de long est lancée horizontalement sur une table à coussin d'air. Elle est photographiée toutes les 40 ms. La vitesse de son centre d'inertie est égale à $30 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Entre deux prises de vue consécutives, la tige tourne autour de son centre d'inertie de 30° . Représenter, à l'échelle 1, dix positions successives de la tige.

17.10 La figure 7 de la page 136 représente le mouvement d'un palet sur une table à coussin d'air. L'enregistrement a été réalisé à l'aide d'un flash émettant 3 éclairs par seconde (stroboscope). Le palet a un diamètre de 10 cm.

1/ Donner le mouvement du centre d'inertie du palet (trajectoire, vitesse).

2/ Quelle durée met le palet pour faire un tour sur lui-même (le palet tourne dans le sens des aiguilles d'une montre)?

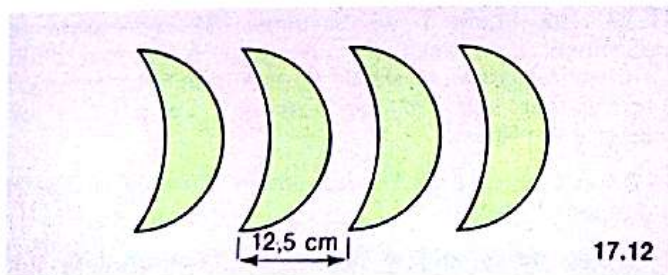
17.11 La figure ci-après, à l'échelle 1/2, représente l'enregistrement du mouvement de deux points G et A d'un palet lancé sur coussin d'air. A la date t_0 , on obtient le marquage (G_0, A_0) . Durée entre deux marquages successifs : 60 ms.



17.11

- 1/ Donner le mouvement de G (trajectoire, vitesse).
- 2/ Représenter le palet à la date t_7 .
- 3/ Quelle est la nature du mouvement propre du palet?
- 4/ Déterminer la vitesse de A , par rapport à la table à coussin d'air, aux dates t_2 et t_5 .
- 5/ Déterminer la vitesse de A , dans le mouvement propre du palet autour de G , aux deux mêmes dates.

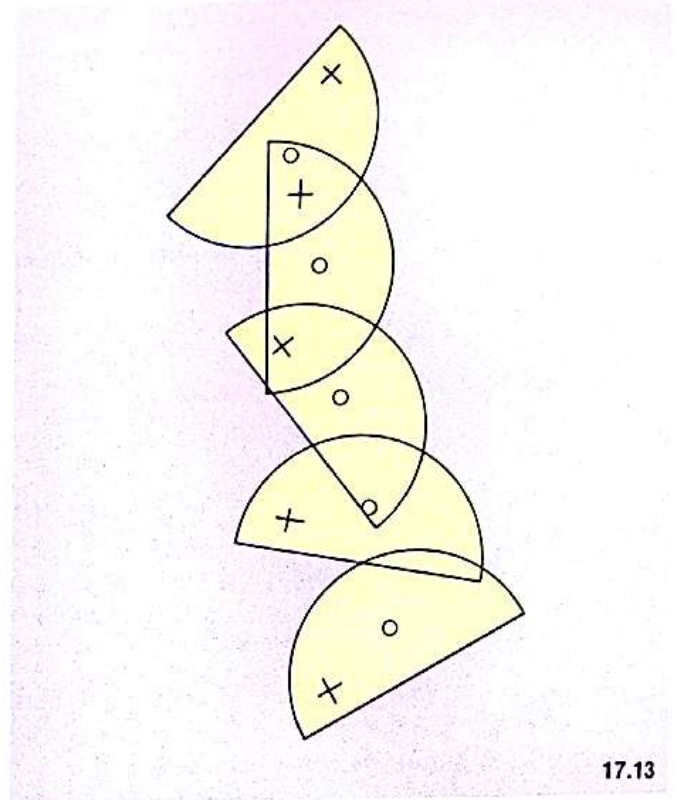
17.12 La figure ci-dessous représente l'enregistrement de diverses positions d'un palet lancé sur une table à coussin d'air.



17.12

- 1/ Le palet est-il en translation rectiligne uniforme?
- 2/ Peut-on, grâce à cet enregistrement, déterminer la position du centre d'inertie G du palet?
- 3/ Calculer la vitesse du centre d'inertie. L'intervalle de temps entre deux clichés est de $1/25$ s. Échelle de représentation $1 \text{ cm} \leftrightarrow 10 \text{ cm}$.

17.13 On a représenté ci-après l'enregistrement stroboscopique d'un palet hémicylindrique sur une table à coussin d'air. Deux points du palet sont repérés par les marques $+$ et \circ . Le dessin est à l'échelle $1 \text{ cm} \leftrightarrow 7,5 \text{ cm}$.



17.13

- 1/ Lequel des deux points correspond au centre d'inertie de la plaque?
- 2/ Déterminer la vitesse du centre d'inertie G ? La durée entre deux pointés est de 50 ms.
- 3/ Quel est le mouvement de la plaque autour de son centre d'inertie?

Pour aller plus loin
Barycentre - Centre d'inertie

17.14 Un solide est constitué de différentes parties pleines. Son centre d'inertie peut-il être situé à l'extérieur de la matière qui constitue le solide? Donner un exemple.

17.15 Une équerre de menuisier est schématisée par deux règles homogènes de même dimension, à angle droit, dont l'une a une masse deux fois plus grande que l'autre. Déterminer la position du centre d'inertie de l'équerre (faire un dessin).

17.16 Une roue d'automobile est déséquilibrée. Son centre d'inertie est à $0,1 \text{ cm}$ de l'axe de rotation. Sa masse est de 10 kg , le rayon de la jante 25 cm . Trouver la masse de la masselotte de plomb qu'il est nécessaire de mettre sur le pourtour de la jante pour ramener le centre d'inertie de l'ensemble sur l'axe (faire un dessin).

17.17 On considère deux masses m_A et m_B , de dimensions très petites, placées aux extrémités d'une tige AB de masse négligeable et de longueur 1 m . Déterminer la position du centre d'inertie de l'ensemble si $m_A = 1 \text{ kg}$ et $m_B = 0,5 \text{ kg}$.

17.18 Même exercice que le précédent en considérant que la tige homogène AB a une masse de 0,5 kg.

17.19 Un cylindre est formé de deux parties :
 — une partie en bois, de longueur 10 cm ;
 — une partie en alliage, de longueur 1 cm.
 Déterminer la position du centre d'inertie de ce cylindre.
Données : masse volumique du bois : $0,8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$; masse volumique de l'alliage : $8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

17.20 On assimile la Terre et la Lune à deux sphères homogènes dont les centres sont à une distance moyenne de $3,8 \cdot 10^5 \text{ km}$.

1/ Sachant que le rapport des masses $\frac{M_T}{M_L}$ est égal à 82, déterminer la position du centre d'inertie du système {Terre + Lune}.

2/ La masse du Soleil est environ égale à $2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$; la distance Terre-Soleil est environ de $1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$. Déterminer la position du centre d'inertie du système {Terre + Soleil}.

Données : $R_T = 6400 \text{ km}$; $M_T \approx 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$.

17.21 On veut déterminer le centre d'inertie de quelques molécules.

1/ La molécule de CO_2 a son centre d'inertie qui coïncide avec l'atome de carbone. Que peut-on dire de la structure de cette molécule ?

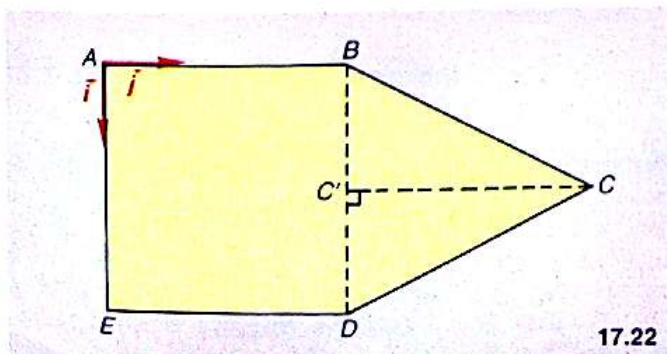
2/ La molécule d'eau est telle que les distances entre les deux noyaux des atomes d'hydrogène et d'oxygène sont environ égales à 100 pm ; l'écart angulaire formé par les deux directions $[O, H]$ est voisin de 105° . Déterminer la position du centre de masse de la molécule.

3/ Même question avec la molécule de dioxyde d'azote NO_2 , avec :

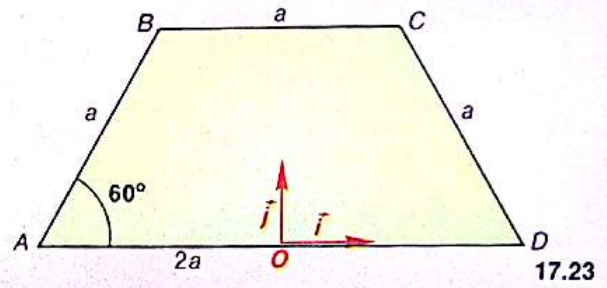
distance $ON = 150 \text{ pm}$ et $\widehat{ONO} = 134^\circ$.

Données : $M_N = 14 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $M_O = 16 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $M_H = 1 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

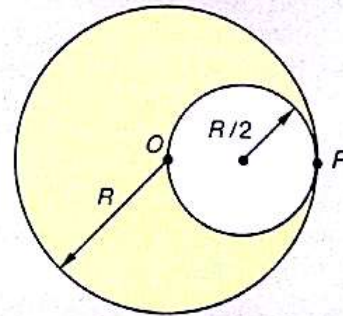
17.22 La plaque $ABCDE$, représentée ci-après, homogène et d'épaisseur constante, est formée d'une partie carrée $ABDE$, de côté $a = 3 \text{ cm}$, et d'une partie triangulaire ($BD = CC' = a = 3 \text{ cm}$). Déterminer graphiquement la position du centre d'inertie de cette plaque, puis par le calcul, en utilisant le repère (A, \vec{i}, \vec{j}) .



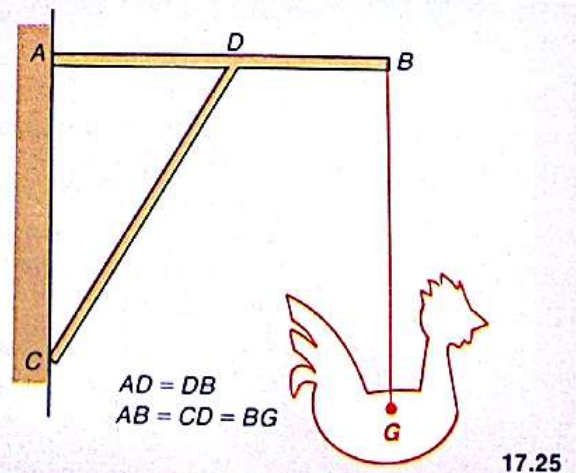
17.23 La plaque $ABCD$, représentée ci-après, homogène et d'épaisseur constante, a une forme trapézoïdale, avec : $AB = BC = CD = a$ et la base $AD = 2a$. Déterminer graphiquement la position du centre d'inertie de cette plaque, puis par le calcul, en utilisant le repère (O, \vec{i}, \vec{j}) , avec O milieu de AD .



17.24 Dans un disque plat homogène de rayon R , on découpe un disque de rayon $R/2$, comme l'indique la figure ci-dessous. Calculer la position du centre d'inertie du croissant ainsi réalisé. Quelle masse, considérée comme ponctuelle, faudrait-il placer en P pour ramener le centre d'inertie en O ?



17.25 Une enseigne est accroché à un mur comme l'indique la figure ci-dessous. Les barres AB et CD sont identiques, de longueur a et de masse $m = 5 \text{ kg}$. L'enseigne a une masse $m_1 = 10 \text{ kg}$ et le fil qui la soutient une masse négligeable. Déterminer graphiquement la position du centre d'inertie de l'ensemble, sachant que le centre d'inertie de l'enseigne est tel que $BG = a$.



18.

Quantité de mouvement d'un solide

18.1 le vecteur quantité de mouvement

18.1.1 expérience

Deux mobiles autoporteurs, S_1 (masse m_1 , centre d'inertie G_1) et S_2 (m_2 , G_2), sont reliés par deux fils F et par un ressort de masse négligeable par rapport à m_1 et m_2 (fig. 1). Les deux solides étant initialement immobiles et le ressort comprimé sur la table à coussin d'air horizontale, brûlons les fils F . Le ressort se détend brusquement et se détache des palets : ceux-ci partent selon la même direction, mais en sens opposés.

En se détendant, le ressort repousse de la même façon les mobiles. Pourtant, si les mobiles ont des masses différentes, ils ne partent pas avec la même vitesse. Le mobile de plus faible masse va le plus vite.

L'étude de la photo 2 de la fiche expérimentale permet d'établir que :

$$\frac{v_{G_2}}{v_{G_1}} = \frac{m_1}{m_2} \iff m_1 \cdot v_{G_1} = m_2 \cdot v_{G_2}$$

Nous pouvons écrire cette équation avec les vecteurs vitesses \vec{v}_{G_1} et \vec{v}_{G_2} qui ont même direction mais des sens opposés :

$$m_1 \cdot \vec{v}_{G_1} = -m_2 \cdot \vec{v}_{G_2}$$

18.1.2 quantité de mouvement

Nous venons d'introduire une nouvelle grandeur : $m \cdot \vec{v}_G$. Par définition :

- Le vecteur quantité de mouvement \vec{p} d'un solide est égal au produit du vecteur vitesse \vec{v}_G de son centre d'inertie G par sa masse m :

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}_G$$

Ainsi les résultats précédents se traduisent avec

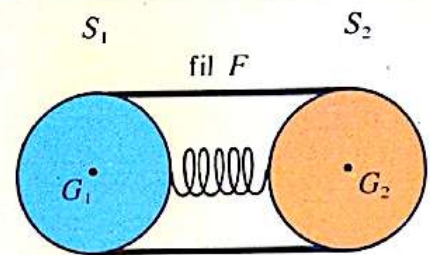
$$\vec{p}_1 = m_1 \cdot \vec{v}_{G_1} \quad \text{et} \quad \vec{p}_2 = m_2 \cdot \vec{v}_{G_2}$$

par :

$$\vec{p}_1 = -\vec{p}_2$$

En norme :

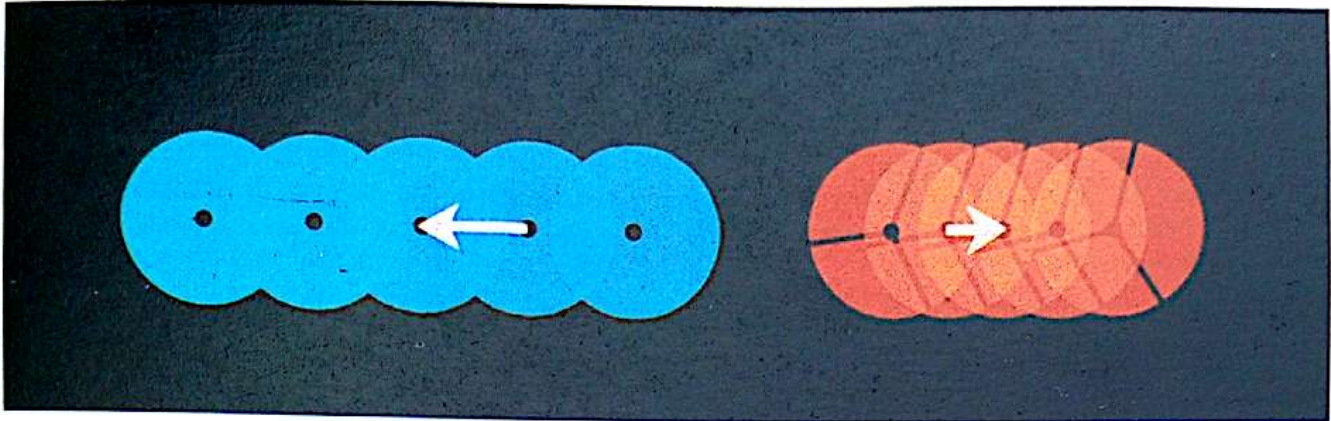
$$\|\vec{p}_1\| = \|\vec{p}_2\|, \quad \text{soit} \quad p_1 = p_2$$



1. Les palets S_1 et S_2 sont retenus par 2 fils F . Lorsqu'on brûle ces derniers, le ressort se détend brusquement et se détache des palets qui partent en sens opposé.

Remarque : Dans le cas considéré, les palets sont animés de mouvements de translation. Le vecteur vitesse \vec{v}_{G_1} (ou \vec{v}_{G_2}) est donc égal à celui d'un point quelconque du solide S_1 (ou S_2). Toutefois la relation du paragraphe 18.1.1 reste vérifiée dans le cas où les palets sont animés d'un mouvement de rotation propre. C'est la raison pour laquelle on considère effectivement les vecteurs \vec{v}_{G_1} et \vec{v}_{G_2} .

Fiche expérimentale



2. Éclatement d'un système de deux palets sur coussin d'air. La masse du palet orange (m_2) est égale au double de celle du palet bleu (m_1).

Les centres d'inertie G_1 et G_2 des deux mobiles se déplacent sur la même droite en sens inverse. Les photos sont prises à des intervalles de temps τ égaux. On constate que les mouvements de G_1 et G_2 sont rectilignes uniformes.

De plus, entre chaque prise de vue, le centre d'inertie G_1 du mobile bleu parcourt une distance deux fois plus importante que celle parcourue par le centre d'inertie G_2 du mobile orange.

Sa vitesse v_{G_1} est donc deux fois plus grande :

$$v_{G_1} = 2 \cdot v_{G_2}.$$

Or $m_2 = 2 \cdot m_1$, d'où : $m_1 \cdot v_{G_1} = m_2 \cdot v_{G_2}$.

En notation vectorielle, les vitesses ayant même direction et des sens opposés :

$$\vec{v}_{G_1} = -2 \cdot \vec{v}_{G_2},$$

soit plus généralement :

$$m_1 \cdot \vec{v}_{G_1} + m_2 \cdot \vec{v}_{G_2} = \vec{0}.$$

Dire que le ressort repousse de la même manière chaque mobile ne veut pas dire qu'il leur communique la même vitesse, mais qu'il leur donne la même quantité de mouvement, grandeur qui tient compte de la vitesse et de la masse. Ce n'est pas la même affaire de lancer à $900 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ une balle de fusil ou un Airbus!

La norme du vecteur quantité de mouvement est appelée usuellement « quantité de mouvement ».

La quantité de mouvement d'un solide se mesure dans le système international en kilogramme-mètre par seconde (symbole : $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), produit de l'unité de masse par l'unité de vitesse :

$$\begin{array}{c} \vec{p} = m \cdot \vec{v}_G \\ \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \quad \text{kg} \quad \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \end{array}$$

18.1.3 quantité de mouvement d'un solide isolé

Le Principe de l'inertie indique que le mouvement du centre d'inertie d'un solide isolé (ou pseudo-isolé) est rectiligne uniforme. Si \vec{v}_G est un vecteur constant, alors le vecteur quantité de mouvement l'est aussi :

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}_G = \text{vecteur constant}.$$

- La quantité de mouvement d'un solide isolé est constante.

Application 1 :

Calculer la quantité de mouvement de la Terre sur son orbite.

Données : masse de la Terre = $6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$; rayon de l'orbite terrestre = $15 \cdot 10^7 \text{ km}$.

Calculons la vitesse, par rapport au référentiel de Copernic, du centre d'inertie de la Terre; nous savons que la durée d'une révolution est de 365,25 jours, soit $3,16 \cdot 10^7 \text{ s}$, donc :

$$v_G = \frac{2\pi \times 150 \cdot 10^9}{3,16 \cdot 10^7} \approx 3 \cdot 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

La quantité de mouvement cherchée est donc :

$$p = m \cdot v_G = 6 \cdot 10^{24} \times 3 \cdot 10^4 = 1,8 \cdot 10^{29} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Application 2 :

Calculer la quantité de mouvement d'une hélice d'avion tournant à $2000 \text{ tours} \cdot \text{min}^{-1}$. Le solide de référence est l'avion.

Le centre d'inertie de l'hélice se trouve, par construction même, sur l'axe de rotation de l'hélice et sa vitesse par rapport à l'avion est nulle : $v_G = 0$.

La relation $\vec{p} = m \cdot \vec{v}_G$ donne une quantité de mouvement par rapport à l'avion nulle. Nous avons là l'exemple d'un solide en mouvement, mais ayant une quantité de mouvement nulle.

18.2 système de deux solides

18.2.1 définition

Considérons deux solides S_1 et S_2 . Soient $\vec{p}_1 = m_1 \cdot \vec{v}_{G_1}$ et $\vec{p}_2 = m_2 \cdot \vec{v}_{G_2}$ leur quantité de mouvement à l'instant t . Par définition :

- Le vecteur quantité de mouvement \vec{p} d'un système de deux solides est égal à la somme des vecteurs quantité de mouvement de chaque solide :

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 = m_1 \vec{v}_{G_1} + m_2 \vec{v}_{G_2}$$

18.2.2 cas d'un système isolé

Considérons à nouveau l'expérience et les résultats du paragraphe 18.1.1.

Avant l'éclatement, les deux solides S_1 et S_2 sont au repos :

$$\vec{p}_1 = \vec{p}_2 = \vec{0}$$

La quantité de mouvement du système est donc nulle, puisque :

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{0}$$

Soit \vec{p}'_1 , \vec{p}'_2 et \vec{p}' les quantités de mouvement respectives de S_1 , de S_2 et du système après l'éclatement :

$$\vec{p}' = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2$$

$$\vec{p}' = m_1 \cdot \vec{v}_{G_1} + m_2 \cdot \vec{v}_{G_2} = \vec{0}$$

La quantité de mouvement \vec{p}' du système est encore nulle. Nous pouvons donc écrire :

$$\vec{p} = \vec{p}'$$

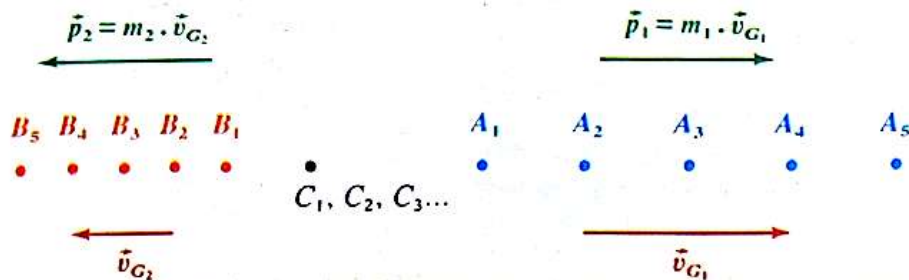
La quantité de mouvement du système pseudo-isolé constitué des deux solides s'est conservée. Ce résultat se généralise pour un système quelconque de deux solides, quels que soient leurs mouvements (voir la partie « pour aller plus loin » en fin de chapitre).

- La quantité de mouvement d'un système isolé (ou pseudo-isolé), déformable ou non, reste constante.

Cette loi de conservation de la quantité de mouvement d'un système isolé est d'un très grand intérêt par son universalité :

- elle est valable quel que soit le type d'interaction qui puisse exister entre les différentes parties du système;
- la taille du système n'a pas d'importance. Elle s'applique aussi bien aux particules qu'aux galaxies.

Fiche expérimentale (suite et complément)



A_1 et B_1 représentent les positions de G_1 et de G_2 avant l'éclatement. Le centre d'inertie G du système est alors en C_1 , situé sur le segment A_1B_1 , tel que :

$$m_1 \cdot C_1A_1 = m_2 \cdot C_1B_1$$

D'où, $m_2/m_1 = 2$:

$$C_1A_1 = 2 \cdot C_1B_1$$

Or $C_1A_1 + C_1B_1 = A_1B_1$,

d'où : $C_1A_1 = \frac{2}{3} A_1B_1$ et $C_1B_1 = \frac{1}{3} A_1B_1$.

Après l'éclatement, les positions C_i de G seront données par :

$$C_iA_i = \frac{2}{3} A_iB_i \quad \text{ou} \quad C_iB_i = \frac{1}{3} A_iB_i$$

On constate que tous les points C_i (C_2, C_3, C_4, \dots) sont confondus. Après l'éclatement, le centre d'inertie est encore au repos : $\vec{v}_G = \vec{0}$. On en déduit que la quantité de mouvement du système est restée nulle après l'éclatement, puisque :

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}_G = \vec{0}$$

Application 3 :

Un wagon de masse $m_1 = 50 \text{ t}$, animé d'une vitesse \vec{v}_1 horizontale et de norme $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, percute un wagon au repos de masse $m_2 = 30 \text{ t}$. Sachant que les deux wagons restent accrochés, calculer leur vitesse commune \vec{v} après le choc. On admettra que la quantité de mouvement se conserve au cours du choc.

Les wagons sont en translation par rapport au sol; tous leurs points ont même vecteur vitesse. En particulier, la vitesse \vec{v}_1 est aussi celle du centre d'inertie du wagon percuteur avant le choc. La quantité de mouvement du wagon percuteur est donc :

$$\vec{p}_1 = m_1 \cdot \vec{v}_1.$$

Celle du wagon au repos est :

$$\vec{p}_2 = \vec{0}.$$

Après le choc, ces quantités deviennent :

$$\vec{p}'_1 = m_1 \cdot \vec{v} \quad \text{et} \quad \vec{p}'_2 = m_2 \cdot \vec{v}.$$

Si nous admettons la conservation de la quantité de mouvement du système au cours du choc, nous écrivons :

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2,$$

soit :

$$m_1 \cdot \vec{v}_1 = (m_1 + m_2) \cdot \vec{v};$$

d'où :

$$\vec{v} = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot \vec{v}_1.$$

\vec{v} a donc la direction et le sens de \vec{v}_1 et sa norme est égale à :

$$v = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot v_1.$$

Numériquement $v = 6,25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Les deux wagons accrochés partent dans le sens du wagon percuteur, à la vitesse de $6,25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Application 4 : Recul d'une arme à feu

Un canon de masse 1 t lance un obus de 10 kg dont la vitesse initiale est $750 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Calculer la vitesse de recul du canon immédiatement après le tir.

Au départ d'un coup de canon, l'obus et le canon sont en mouvement de translation l'un par rapport à l'autre. Lorsque l'obus est éjecté, le canon recule. Considérons le cas le plus simple où le canon est disposé horizontalement; le système {obus, canon} n'est pas isolé : il est soumis à son poids et se trouve en contact avec le sol. Nous admettrons cependant que, dans ce cas, on peut considérer le système comme pseudo-isolé pendant la propulsion de l'obus à l'intérieur du canon. Soit \vec{v}'_1 le vecteur vitesse par rapport au sol du centre d'inertie de l'obus à l'éjection et \vec{v}'_2 celui du canon. Soient m_1 et m_2 les masses de l'obus et du canon.

Avant le tir, la quantité de mouvement du système {obus, canon} est nulle, chaque partie du système étant au repos.

Après le tir, la quantité de mouvement du système est :

$$\vec{p}' = m_1 \cdot \vec{v}'_1 + m_2 \cdot \vec{v}'_2.$$

D'après la loi de conservation de la quantité de mouvement : $\vec{p}' = \vec{0}$. D'où :

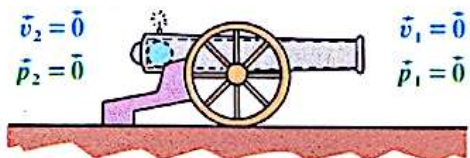
$$m_1 \cdot \vec{v}'_1 + m_2 \cdot \vec{v}'_2 = \vec{0},$$

soit :

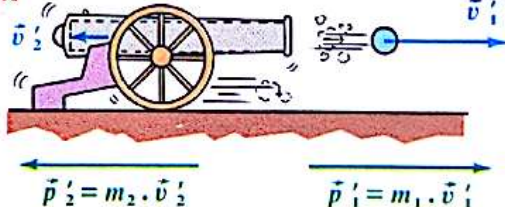
$$\vec{v}'_2 = -\frac{m_1}{m_2} \cdot \vec{v}'_1.$$

Le canon et l'obus étant en translation, tous les points d'un même objet, et en particulier le centre d'inertie, ont la même vitesse. La vitesse du canon est de sens opposé à celle de l'obus.

avant



après



$$\vec{p}'_1 + \vec{p}'_2 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2 = \vec{0}$$

Le canon recule après le tir.

Numériquement :

$$\|\vec{v}'_2\| = \frac{m_1}{m_2} \cdot \|\vec{v}'_1\|$$

$$\|\vec{v}'_2\| = \frac{10}{1000} \times 750 = 7,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

\vec{v}'_1 et \vec{v}'_2 sont les vitesses à l'instant du tir; ensuite, ces vitesses sont évidemment modifiées : le canon est arrêté par le sol, l'obus tombe vers le sol.

Lorsqu'un fusil est mal épaulé, le tireur reçoit violemment la crosse sur la clavicle ou sur la joue. Au contraire, si la crosse fait bloc avec l'épaule, le recul devient moins sensible; la masse m de l'ensemble tireur-fusil est plus importante; sa vitesse est donc plus petite.

18.3 transfert de quantité de mouvement

Revenons à l'expérience initiale de l'éclatement d'un système pseudo-isolé (photo 2).

Avant l'éclatement, S_1 et S_2 ont une quantité de mouvement nulle.

Après l'éclatement, la quantité de mouvement de S_1 est \vec{p}_1 et celle de S_2 , \vec{p}_2 , telle que :

$$\vec{p}_1 = -\vec{p}_2.$$

La variation de la quantité de mouvement de la partie S_1 s'accompagne donc de la variation opposée de la quantité de mouvement de l'autre partie S_2 .

Cette propriété est générale pour les systèmes isolés :

- La variation de la quantité de mouvement d'une partie d'un système isolé implique une variation opposée de la quantité de mouvement de l'autre partie.

Cela se traduit par :

$$\vec{\Delta p}_1 = -\vec{\Delta p}_2.$$

Nous pouvons dire qu'il y a transfert de quantité de mouvement à l'intérieur du système.

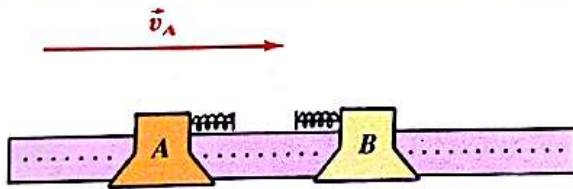
Ce transfert résulte de l'interaction entre les deux parties du système.

Ce point sera développé au chapitre suivant.

Application 5 :

Sur un banc à coussin d'air, deux mobiles A et B pseudo-isolés sont en mouvement l'un vers l'autre avec une vitesse de translation \vec{v}_A pour le mobile A, le mobile B étant au repos.

Les deux mobiles se télescopent; le mobile B est projeté vers la droite avec une vitesse \vec{v}'_B . Les vitesses sont mesurées à l'aide de cellules photoélectriques.



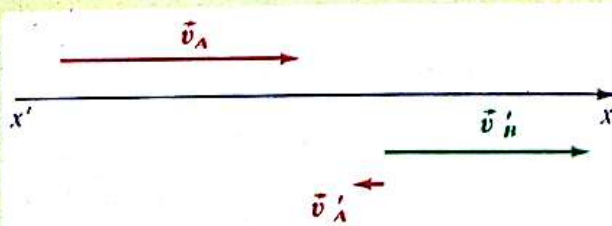
1/ En appliquant la loi de conservation de la quantité de mouvement, calculer la vitesse \vec{v}'_A du mobile A après le choc. On déterminera son sens et sa norme.

2/ Vérifier qu'il y a transfert de quantité de mouvement entre les mobiles A et B.

Données : $m_A = 100 \text{ g}$; $m_B = 130 \text{ g}$;

$$v'_B = 12,0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}; \quad v_A = 13,8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}.$$

1/ Les deux mobiles sont en translation suivant un axe ($x'x, \vec{i}$).



Tous les points de chaque mobile ont même vitesse; les vitesses \vec{v}_A et \vec{v}_B sont aussi celles des centres d'inertie des mobiles A et B.

Avant le choc: $\vec{v}_A = v_A \vec{i}$; $\vec{v}_B = \vec{0}$;

$$\vec{p} = m_A \cdot v_A \vec{i} + \vec{0} = m_A \cdot v_A \vec{i}.$$

Après le choc : $\vec{v}'_A = v'_A \vec{i}$; $\vec{v}'_B = v'_B \vec{i}$;

$$\vec{p}' = m_A \cdot v'_A \vec{i} + m_B \cdot v'_B \vec{i} = (m_A \cdot v'_A + m_B \cdot v'_B) \vec{i}.$$

Appliquons la loi de conservation de la quantité de mouvement pour l'ensemble des deux mobiles; chacun d'eux étant pseudo-isolés, l'ensemble l'est aussi :

$$\vec{p} = \vec{p}'.$$

Donc $m_A \cdot v_A \vec{i} = (m_A \cdot v'_A + m_B \cdot v'_B) \vec{i}$,

d'où : $m_A \cdot v_A = m_A \cdot v'_A + m_B \cdot v'_B$.

Il vient : $v'_A = v_A - \frac{m_B}{m_A} \cdot v'_B$.

Numériquement :

$$v'_A = 13,8 - 1,3 \times 12 = -1,8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1};$$

$$\vec{v}'_A = -1,8 \vec{i}.$$

Le mobile A est projeté en arrière avec une vitesse de $1,8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

2/ Le mobile A subit une variation de quantité de mouvement :

$$\vec{\Delta p}_A = \vec{p}'_A - \vec{p}_A = m_A \cdot \vec{v}'_A - m_A \cdot \vec{v}_A$$

$$\vec{\Delta p}_A = m_A \cdot (v'_A - v_A) \vec{i}$$

$$\vec{\Delta p}_A = 0,1 \cdot (-1,8 - 13,8) \cdot 10^{-2} \vec{i} = -1,56 \cdot 10^{-2} \vec{i}$$

(en $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Le mobile B subit une variation de quantité de mouvement :

$$\vec{\Delta p}_B = \vec{p}'_B - \vec{p}_B = m_B \cdot \vec{v}'_B - m_B \cdot \vec{0}$$

$$\vec{\Delta p}_B = m_B \cdot v'_B \vec{i}$$

$$\vec{\Delta p}_B = 0,13 \times 12 \cdot 10^{-2} \vec{i} = 1,56 \cdot 10^{-2} \vec{i}$$

$$\vec{\Delta p}_B = -\vec{\Delta p}_A.$$

POUR ALLER PLUS LOIN

Cas de mouvements non rectilignes

Première expérience : conservation de la quantité de mouvement d'un système déformable

Deux palets S_1 et S_2 liés par un élastique sont lancés sur une table à coussin d'air horizontale. Le système est pseudo-isolé. Les palets attirés l'un vers l'autre par l'élastique se repoussent lors du choc.

Les positions des centres d'inertie G_1 (points A_i) et G_2 (points B_i) sont enregistrées à des intervalles égaux $\tau = 2 \cdot 10^{-2}$ s.

Connaissant les masses $m_1 = 0,5$ kg et $m_2 = 1$ kg, on détermine la trajectoire du centre d'inertie G de l'ensemble. Le vecteur \vec{v}_G est constant; le système est bien pseudo-isolé.

● Quantité de mouvement du système $\{S_1, S_2\}$
 Déterminons le vecteur quantité de mouvement de l'ensemble, tel que $\vec{p} = (m_1 + m_2) \cdot \vec{v}_G$.

$$v_G = \frac{C_0 C_7}{7\tau} = \frac{11,1 \cdot 10^{-2}}{7 \times 0,02} \approx 0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$p = (m_1 + m_2) \cdot v_G = (0,5 + 1) \times 0,8 = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

A l'échelle $1 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \leftrightarrow 4 \text{ cm}$, le vecteur \vec{p} est représenté par un vecteur du plan parallèle à la trajectoire de G et de longueur 4,8 cm.

● Quantité de mouvement de S_1 et de S_2
 Les trajectoires des centres d'inertie de S_1 et de S_2 sont curvilignes : les solides S_1 et S_2 ne sont pas pseudo-isolés. Leur vecteur vitesse et leur quantité de mouvement changent à chaque instant.

Déterminons la quantité de mouvement \vec{p}_1 de S_1 à l'instant t_2 correspondant au point A_2 , par exemple :

$$\vec{v}_{G_1}(t_2) \approx \frac{\overline{A_1 A_3}}{t_3 - t_1}$$

$$v_{G_1} = \frac{A_1 A_3}{2\tau} = \frac{4,4 \cdot 10^{-2}}{2 \times 2 \cdot 10^{-2}} = 1,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\vec{p}_1 = m_1 \cdot \vec{v}_{G_1}; p_1 = 0,5 \times 1,1 = 0,55 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

\vec{p}_1 est représenté par un vecteur de 2,2 cm, de même orientation que $\overline{A_1 A_3}$.

Au même instant pour S_2 :

$$\vec{p}_2 = m_2 \cdot \vec{v}_{G_2}; p_2 = 1 \times 0,8 = 0,8 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

\vec{p}_2 est représenté par un vecteur de 3,2 cm, de même orientation que $\overline{B_1 B_3}$.

Réalisons la somme vectorielle $\vec{p}_1 + \vec{p}_2$: nous obtenons un vecteur égal au vecteur \vec{p} . Nous vérifions donc l'identité :

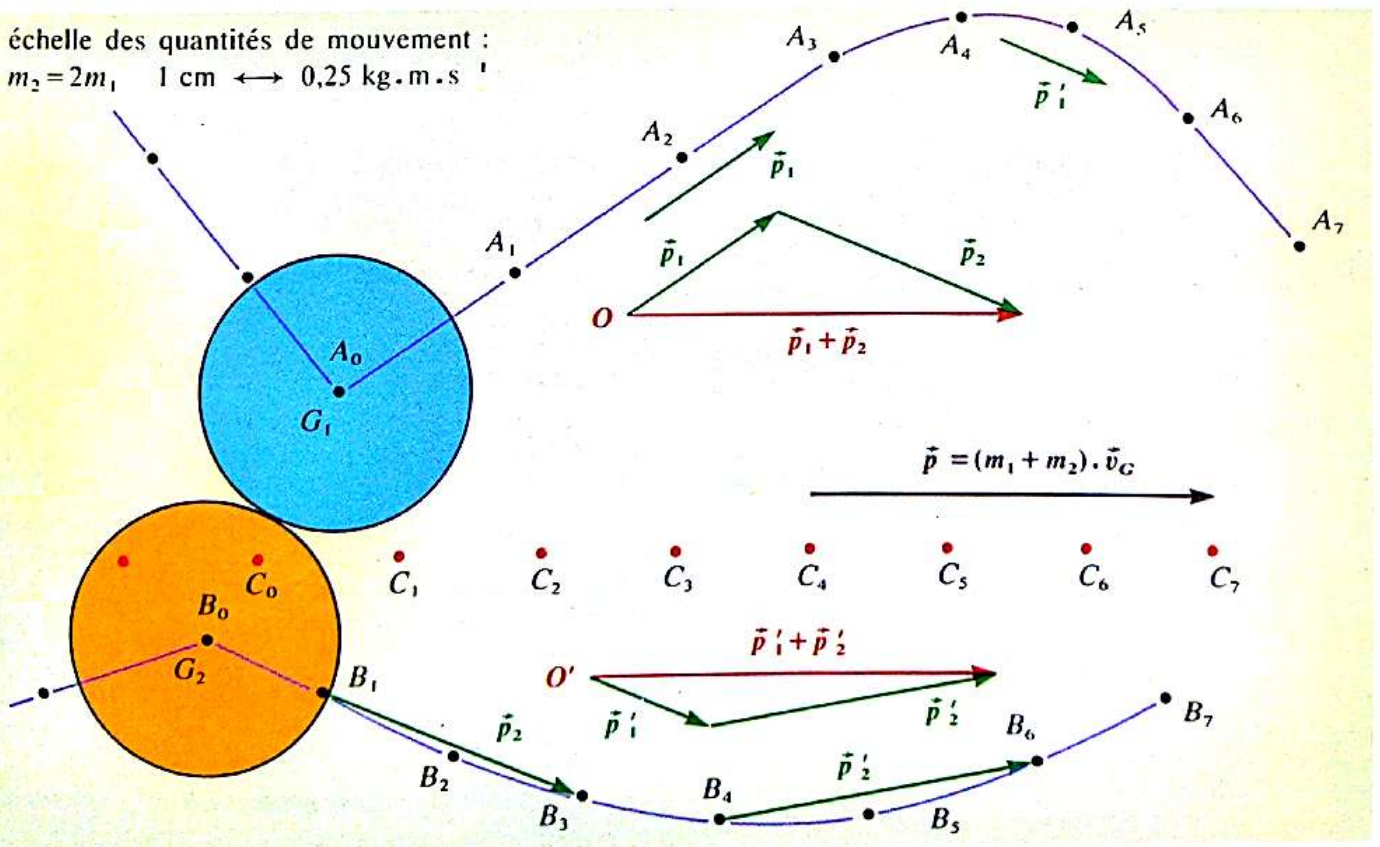
$$\vec{p} = (m_1 + m_2) \cdot \vec{v}_G = m_1 \cdot \vec{v}_{G_1} + m_2 \cdot \vec{v}_{G_2}$$

Cette égalité peut d'ailleurs se démontrer mathématiquement à partir de la relation relative à la détermination du barycentre des deux palets :

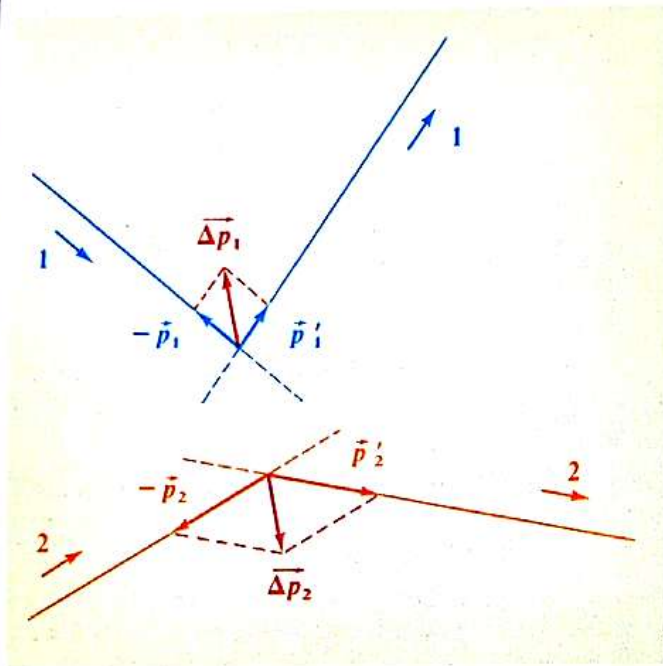
$$(m_1 + m_2) \cdot \overline{OG} = m_1 \cdot \overline{OG_1} + m_2 \cdot \overline{OG_2}$$

On retrouve le même résultat à toute autre date, t_5 par exemple. La loi de conservation de la quantité de mouvement est donc générale, que le système considéré soit déformable ou rigide. Cette loi n'est qu'une forme équivalente du Principe de l'inertie; en effet, si le système est isolé ou pseudo-isolé, \vec{v}_G est un vecteur constant, ce qui implique que \vec{p} l'est aussi.

échelle des quantités de mouvement :
 $m_2 = 2m_1$ $1 \text{ cm} \leftrightarrow 0,25 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$



Deuxième expérience :
transfert de la quantité de mouvement

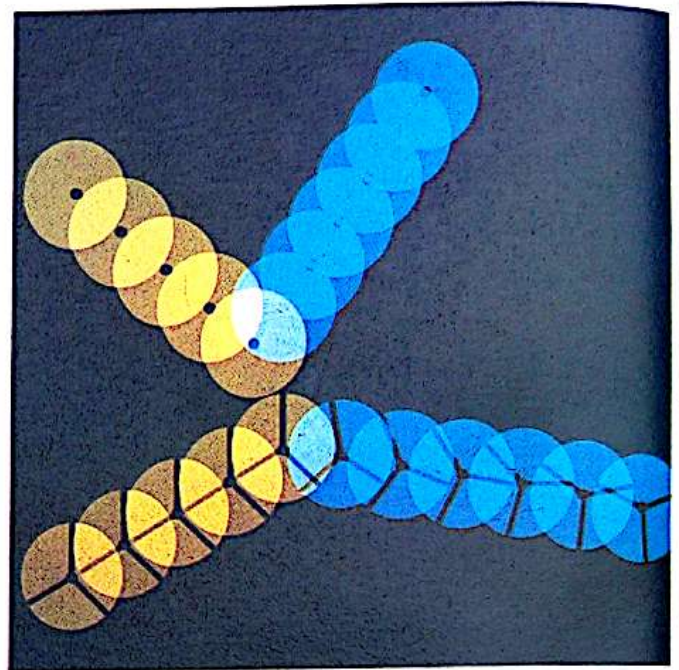


Deux palets sur coussin d'air sont lancés l'un vers l'autre sur une table horizontale. Le palet 2 a une masse double de celle du palet 1.

On a tracé :

\vec{p}_1 avant le choc; \vec{p}'_1 après le choc; $\Delta \vec{p}_1 = \vec{p}'_1 - \vec{p}_1$;

\vec{p}_2 avant le choc; \vec{p}'_2 après le choc; $\Delta \vec{p}_2 = \vec{p}'_2 - \vec{p}_2$.



Nous constatons expérimentalement que :

$$\Delta \vec{p}_1 = -\Delta \vec{p}_2.$$

Au cours de l'interaction entre les deux palets au moment du choc, il y a eu transfert de quantité de mouvement. Nous généralisons ainsi pour les mouvements non rectilignes les résultats du paragraphe 18.3.

Faire le point

- Définir le vecteur quantité de mouvement d'un solide.
- Qu'appelle-t-on transfert de quantité de mouvement au sein d'un système?
- Rappeler les deux manières de définir la quantité de mouvement d'un système de deux solides.
- Qu'en est-il de la quantité de mouvement d'un système isolé?

Quantité de mouvement d'un solide

18.1 Calculer la quantité de mouvement d'une Peugeot 205 de masse totale 840 kg, roulant en ligne droite à une vitesse de $130 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

18.2 Calculer la quantité de mouvement d'une balle de 50 g éjectée à une vitesse de $700 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

18.3 Dans un tube cathodique, un électron est éjecté d'un canon à électrons à une vitesse de $18\,000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Calculer sa quantité de mouvement (masse de l'électron : $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$).

18.4 A un instant donné, la vitesse du centre d'inertie d'un ballon de rugby de masse 400 g est de $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

1/ Calculer sa quantité de mouvement à cet instant. Dépend-elle de son mouvement de rotation?

2/ Cette quantité de mouvement se conserve-t-elle au cours de la trajectoire ultérieure?

18.5 Le centre d'inertie de la Terre décrit autour du Soleil une orbite quasi circulaire de rayon $1,49 \cdot 10^{11} \text{ m}$ en 365,25 jours, à vitesse quasi uniforme. Sa masse est égale à $5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$.

1/ Calculer la quantité de mouvement de la Terre.

2/ La Terre tourne sur elle-même; cette rotation a-t-elle une influence sur sa quantité de mouvement?

3/ Le vecteur quantité de mouvement de la Terre varie-t-il? Pourquoi?

18.6 Le rotor d'un alternateur, de masse 500 tonnes, tourne autour d'un axe fixe, à la vitesse angulaire de 3000 tours par minute.

1/ Calculer la vitesse d'un de ses points situé à 2 mm de l'axe.

2/ Calculer la quantité de mouvement du rotor, son centre d'inertie étant situé sur l'axe.

3/ Le centre d'inertie se déplace à 2 mm de l'axe à la suite d'un incident. Calculer la quantité de mouvement du rotor.

Quantité de mouvement d'un système

18.7 En vous servant de la notion de quantité de mouvement, répondre aux questions suivantes :

1/ Lorsqu'une personne saute d'une barque sur la berge, la barque s'éloigne du bord. Expliquer pourquoi.

2/ Le bateau avec lequel Obélix transporte un menhir est immobile. Obélix lance son menhir de l'avant vers l'arrière du bateau. Décrire le mouvement du bateau lorsque la pierre est en l'air, lorsqu'elle s'est immobilisée à l'arrière du bateau. Obélix a-t-il trouvé un moyen de propulsion?

3/ Les coquilles Saint-Jacques, les poulpes se propulsent par réaction. Comment font-ils?

18.8 Une balle de pistolet, de 2 g, quitte le canon avec une vitesse de $300 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Le pistolet a une masse de 1 kg. Calculer la quantité de mouvement du pistolet. Quelle est sa vitesse de recul?

18.9 Une patineuse sur glace, immobile, de masse 45 kg, attrape une balle de 200 g lancée avec une vitesse horizontale de $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Calculer la vitesse de la patineuse après le blocage de la balle.

18.10 Sur l'astéroïde B 612, le *Petit Prince* coupe son baobab; que se passe-t-il lorsqu'il tombe? Il le lance ensuite dans l'espace; qu'arrive-t-il? Puis, le *Petit Prince* court autour de l'astre; que se passe-t-il?

Une météorite de 100 g, de vitesse $1\,000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, heurte l'astéroïde et s'y enfonce. Calculer la variation de vitesse de l'astéroïde, la masse du B 612 étant de 1000 kg.

18.11 Sur une table à coussin d'air horizontale, deux palets aimantés, qui se repoussent, sont attachés l'un à l'autre par un fil court. A l'instant $t=0 \text{ s}$, les palets étant immobiles, on brûle le fil; ceux-ci s'éloignent l'un de l'autre. Les masses des palets sont $m_1=790 \text{ g}$ et $m_2=1\,090 \text{ g}$.

1/ Quelles sont les trajectoires des centres d'inertie G_1 et G_2 de chaque palet? Quelle est la trajectoire du centre d'inertie de l'ensemble?

2/ Au bout de 1,6 s, le palet de masse m_1 a parcouru la distance de 80 cm. En déduire la vitesse de chaque palet.

18.12 Une locomotive de 60 t, roulant à la vitesse de $18 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ sur une voie rectiligne et horizontale, vient heurter un wagon de masse 16 t immobile sur la voie; ils s'accrochent l'un à l'autre.

1/ En considérant que le système est pseudo-isolé, calculer la vitesse du convoi après l'accrochage.

2/ Ce convoi vient à nouveau s'accrocher à un autre wagon immobile de masse 8 t. Quelle est la vitesse du convoi après l'accrochage?

3/ Ce convoi rattrape un wagon de masse 12 t qui se déplace dans la même direction et le même sens avec une vitesse de $3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Quelle est la vitesse du nouveau convoi après l'accrochage?

Interactions de particules

18.13 Un proton, de masse m_p , de vitesse $2,50 \cdot 10^4 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, heurte de plein fouet un noyau d'hélium immobile. Le proton rebondit en arrière, selon la même direction et avec une vitesse de $1,5 \cdot 10^4 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.

1/ Quelle est la direction du vecteur vitesse du noyau d'hélium?

2/ La norme du vecteur vitesse du noyau d'hélium étant égale à $10^4 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, calculer le rapport $\frac{m_{\text{He}}}{m_p}$.

Sachant que ce noyau comporte deux protons, quel est le nombre de neutrons qu'il contient? On a : $m_n \approx m_p$. On supposera le système {proton + noyau d'hélium} isolé.

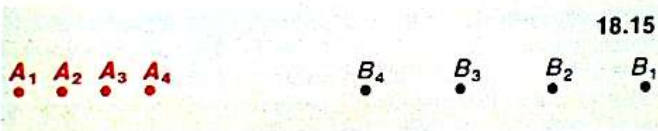
18.14 Un neutron de vitesse $52000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ rencontre de plein fouet le noyau d'un atome de sodium ^{23}Na au repos. Il rebondit avec une vitesse de $47650 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ dans la direction qu'il avait avant le choc. Le noyau Na est projeté avec une vitesse de $4350 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.

1/ Préciser la direction d'éjection du noyau Na.

2/ Calculer le rapport de la masse du noyau m_{Na} à la masse du neutron m_n . Calculer m_{Na} sachant que $m_n = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

Études d'enregistrements

18.15 Deux palets identiques, de masse $m = 0,7 \text{ kg}$, sont animés d'un mouvement de translation rectiligne sur une table à coussin d'air. On a enregistré la trajectoire de leur centre d'inertie G_1 et G_2 (points A_i et B_i). Durée entre deux enregistrements : 20 ms.



1/ Tracer les vecteurs vitesse de chaque mobile. Caractériser leur mouvement.

2/ Quel est le vecteur quantité de mouvement de l'ensemble des deux palets?

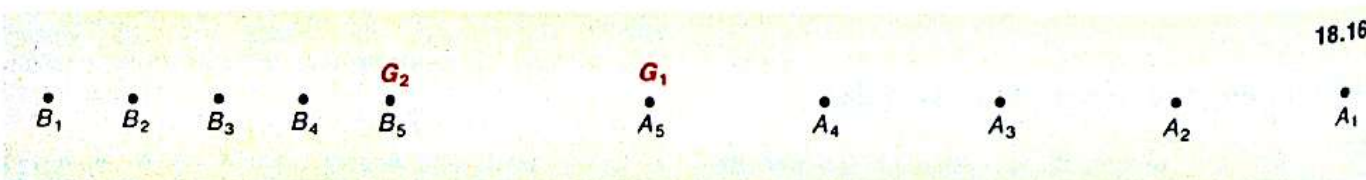
3/ Après le choc, tracer le vecteur vitesse du centre d'inertie de l'ensemble des deux palets en supposant qu'ils restent accolés l'un à l'autre et qu'il y a, au cours du choc, conservation de la quantité du mouvement.

18.16 Sur un banc à coussin d'air horizontal, on a repéré, à intervalles de temps égaux à $\tau = 20 \text{ ms}$, les positions des centres d'inertie G_1 et G_2 de deux solides A et B. Ces solides se dirigent l'un vers l'autre. La masse de A est égale à 150 g, celle de B à 50 g.

1/ L'échelle du document ci-dessous étant 1/5, calculer la vitesse du centre d'inertie de chaque solide.

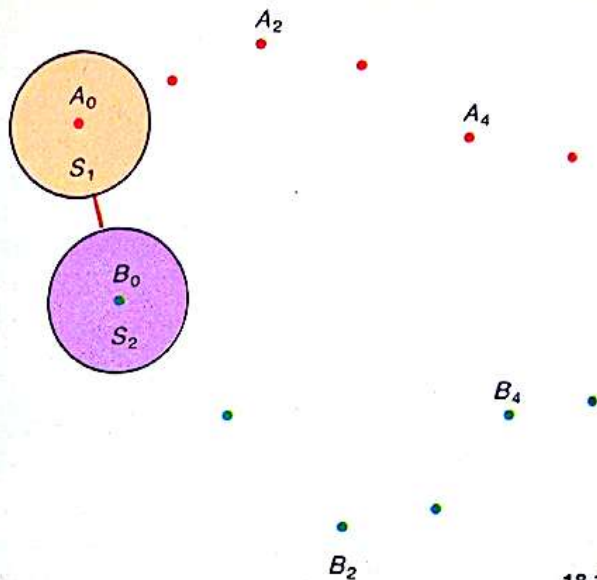
2/ Déterminer la quantité de mouvement de chaque solide. Représenter les vecteurs quantité de mouvement à l'échelle $1 \text{ cm} \leftrightarrow 0,1 \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

3/ Calculer la quantité de mouvement de l'ensemble {AUB}. En déduire la vitesse du centre d'inertie de cet ensemble.



Pour aller plus loin
Systèmes de deux solides

18.17 Deux palets sur coussin d'air, S_1 et S_2 , sont reliés par un élastique; l'un des palets à une masse double de l'autre. Soit m l'une des masses égale à 100 g (la plus petite). L'intervalle entre deux pointés est de 20 ms. Sur le schéma ci-dessous, les dimensions sont égales au 1/5 des dimensions réelles.



1/ Lequel des deux palets a la plus petite masse?

2/ Déterminer la vitesse et le vecteur quantité de mouvement de chaque palet aux instants t_2 et t_4 .

3/ Tracer à l'instant t_2 et à l'instant t_4 les vecteurs quantité de mouvement de l'ensemble $\{S_1 \cup S_2\}$. Peut-on conclure que le système $\{S_1 \cup S_2\}$ est pseudo-isolé?

4/ Déterminer la trajectoire du centre d'inertie G en appliquant la propriété du barycentre des masses. Retrouver le résultat de la question 3.

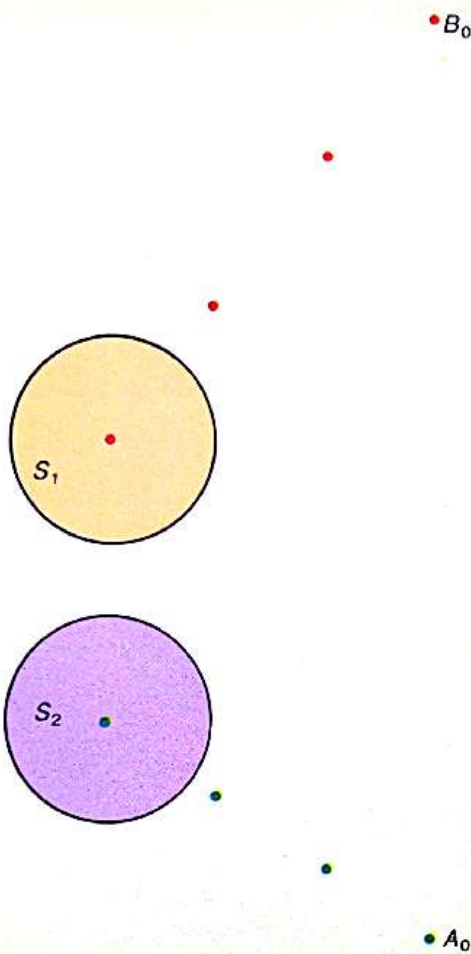
18.18 Un palet D_1 , de masse 200 g, se déplaçant sur une table à coussin d'air horizontale, heurte un autre palet D_2 immobile, de masse 300 g. Après le choc, D_1 est dévié de 40° . La vitesse du centre d'inertie de D_1 est de $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ avant le choc, et de $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ après le choc.

1/ Déterminer graphiquement la direction et la vitesse de D_2 après le choc.

2/ Retrouver ce résultat par le calcul.

18.19 On a représenté l'enregistrement des trajectoires des centres d'inertie de deux palets S_1 et S_2 sur une table à coussin d'air.

18.19



- 1/ Caractériser le mouvement de chacun de ces points.
- 2/ La durée entre deux pointés est de 40 ms. Calculer la vitesse du centre d'inertie de chacun des solides.
- 3/ Tracer leur vecteur quantité de mouvement :

$$m_1 = 420 \text{ g}, m_2 = 840 \text{ g}.$$

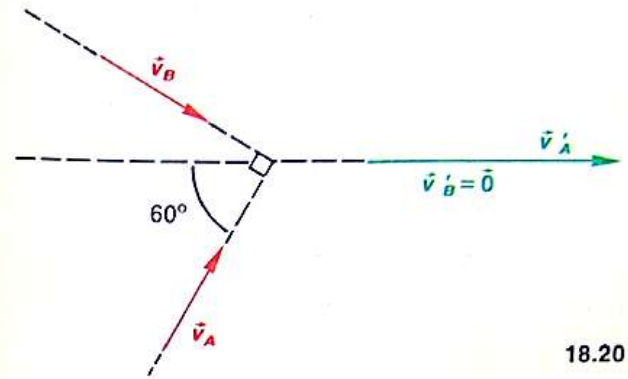
Échelle $1 \text{ cm} \leftrightarrow 0,05 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

- 4/ En déduire le vecteur quantité de mouvement du système formé par l'ensemble des deux palets :

$$\{S_1 \cup S_2\}.$$

- 5/ Retrouver le résultat de la question 4 en déterminant la trajectoire du centre d'inertie G de l'ensemble. On utilisera la propriété du barycentre.

18.20 Deux boules de billard identiques, A et B , sont animées, dans un plan horizontal, d'un mouvement rectiligne et uniforme. Elles se heurtent à angle droit



comme l'indique la figure ci-dessus. La vitesse de la boule A avant le choc est $v_A = 0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Après le choc, la vitesse de la boule B est nulle. Calculer v_B avant le choc et v'_A après le choc. On admettra qu'il y a conservation de la quantité de mouvement.

18.21 Nous verrons dans les classes ultérieures que l'on peut observer la trajectoire de particules chargées dans une chambre à bulles. La photo représente le choc de deux particules, deux protons, l'un initialement immobile, l'autre arrivant à une vitesse $v = 3 \cdot 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ selon l'horizontale. Après le choc, les protons partent dans deux directions différentes.

- 1/ Découper avec soin les trajectoires et les tangentes aux trajectoires au moment de l'impact.
- 2/ Déterminer l'angle des deux trajectoires après le choc.
- 3/ Construire les vecteurs quantité de mouvement avant et après l'impact.
- 4/ En considérant qu'il y a conservation de la quantité de mouvement, calculer la vitesse de chaque proton après l'impact.

Donnée : $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.



Forces et variation de quantité de mouvement

19.1 effet d'une force sur la quantité de mouvement

Nous savons que relativement à un référentiel considéré comme galiléen, le mouvement du centre d'inertie d'un système pseudo-isolé est rectiligne uniforme, la quantité de mouvement du système restant constante. Ce cas est peu fréquent en pratique. Aussi allons-nous analyser quelques expériences où les forces qui s'exercent sur un système ne se compensent plus.

19.1.1 attraction non compensée de la Terre

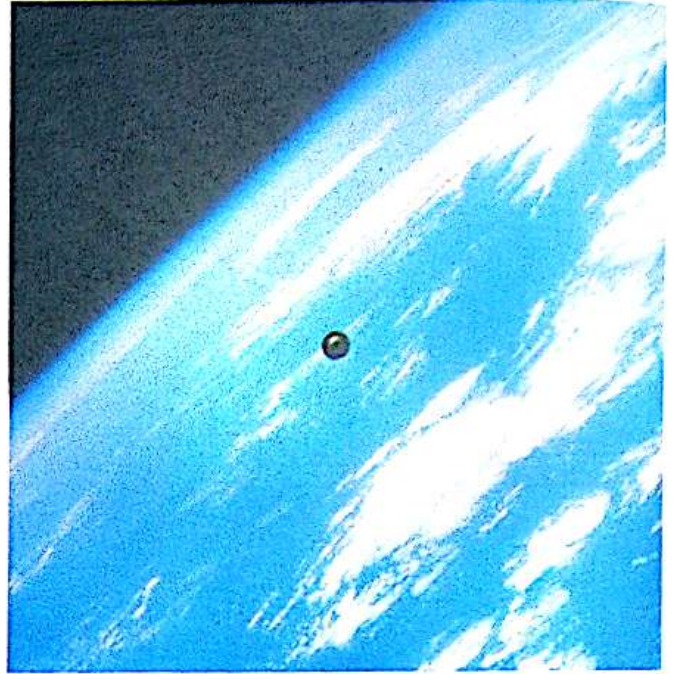
Sous l'effet de son poids, un objet lâché d'une certaine hauteur tombe en chute libre.

Ce solide n'est pas pseudo-isolé : son poids n'est pas compensé par une autre force (comme c'est le cas pour les expériences sur coussin d'air). Le solide va de plus en plus vite dans sa chute. Le mouvement de son centre d'inertie est accéléré, et sa quantité de mouvement croît.

19.1.2 action d'un élastique

Un palet lancé sur une table à coussin d'air horizontale est un solide pseudo-isolé. Le poids du palet est compensé par l'action de l'air pulsé qui le sustente. Le mouvement du centre d'inertie est rectiligne uniforme : le vecteur quantité de mouvement du palet est constant. Maintenant, lançons le palet relié à un point fixe par un élastique (*photo 2*). L'élastique, tendu exerce sur le palet une nouvelle force : les actions exercées sur le palet ne se compensent plus. Nous observons un mouvement curviligne du centre d'inertie; le vecteur quantité de mouvement du palet varie.

- Une force ou un système de forces non compensées appliquées à un solide modifient sa quantité de mouvement.



1. Un satellite tourne autour de la Terre sous le seul effet de l'attraction terrestre. Si on l'empêchait de tourner, il tomberait en chute libre.



2. Le palet, relié par un élastique à un point fixe, ne constitue plus un solide pseudo-isolé; son vecteur quantité de mouvement varie.

19.2 existe-t-il une relation entre \vec{F} et $\Delta\vec{p}$?

19.2.1 \vec{F} et $\Delta\vec{p}$ sont colinéaires

Sur la table à coussin d'air horizontale, lançons à nouveau un palet attaché à une extrémité d'un élastique, dont l'autre extrémité est fixée à un point fixe O de la table. Enregistrons le mouvement de son centre d'inertie G .

La figure de la fiche expérimentale représente une partie de cette trajectoire en grandeur réelle. Nous avons tracé, au point A_2 (date t_2), la variation de la quantité de mouvement $\Delta\vec{p}$ du palet entre deux dates très proches t_1 et t_3 entourant t_2 .

Ce vecteur $\Delta\vec{p}$ est dirigé selon $\overline{A_2O}$, c'est-à-dire suivant la direction de l'élastique tendu : cette direction est celle de la force, non compensée, exercée par l'élastique sur le palet. $\Delta\vec{p}$ a également le même sens que la force.

• Une force \vec{F} , non compensée, appliquée à un solide pendant une courte durée Δt provoque pendant cette durée une variation $\Delta\vec{p}$ de la quantité de mouvement de ce solide. \vec{F} et $\Delta\vec{p}$ sont colinéaires et de même sens.

Plus généralement, lorsqu'un solide est soumis à plusieurs forces non compensées, la variation $\Delta\vec{p} = m \cdot \Delta\vec{v}_G$ de sa quantité de mouvement entre deux dates suffisamment rapprochées est colinéaire au vecteur \vec{F} , somme vectorielle de l'ensemble de ces forces.

Remarque : En toute rigueur, et comme le Principe de l'inertie, le résultat précédent n'est vrai que dans un référentiel galiléen.

Fiche expérimentale

Nous allons tracer, au point A_2 (date t_2), la variation de quantité de mouvement $\Delta\vec{p}$ du palet entre deux dates très proches t_1 et t_3 entourant t_2 . \vec{v}_G représente le vecteur vitesse en A_1 , à la date t_1 (avec l'échelle choisie, \vec{v}_G est représenté par le vecteur $\overline{A_0A_2}$).

\vec{v}'_G représente le vecteur vitesse en A_3 (date t_3). $\Delta\vec{v}_G = \vec{v}'_G - \vec{v}_G$, tracé en A_2 (date t_2), peut être considéré approximativement comme la variation du vecteur vitesse du point G entre les dates très proches t_1 et t_3 , entourant t_2 .

$\Delta\vec{v}_G$ est représenté par le vecteur :

$$\overline{A_2A} = \overline{A_2A_4} - \overline{A_0A_2}.$$

$\Delta\vec{v}_G$ a la direction de l'élastique tendu.

$\Delta\vec{p} = m \cdot \Delta\vec{v}_G$ a donc la direction et le sens de la force exercée par l'élastique sur le mobile à la date t_2 .

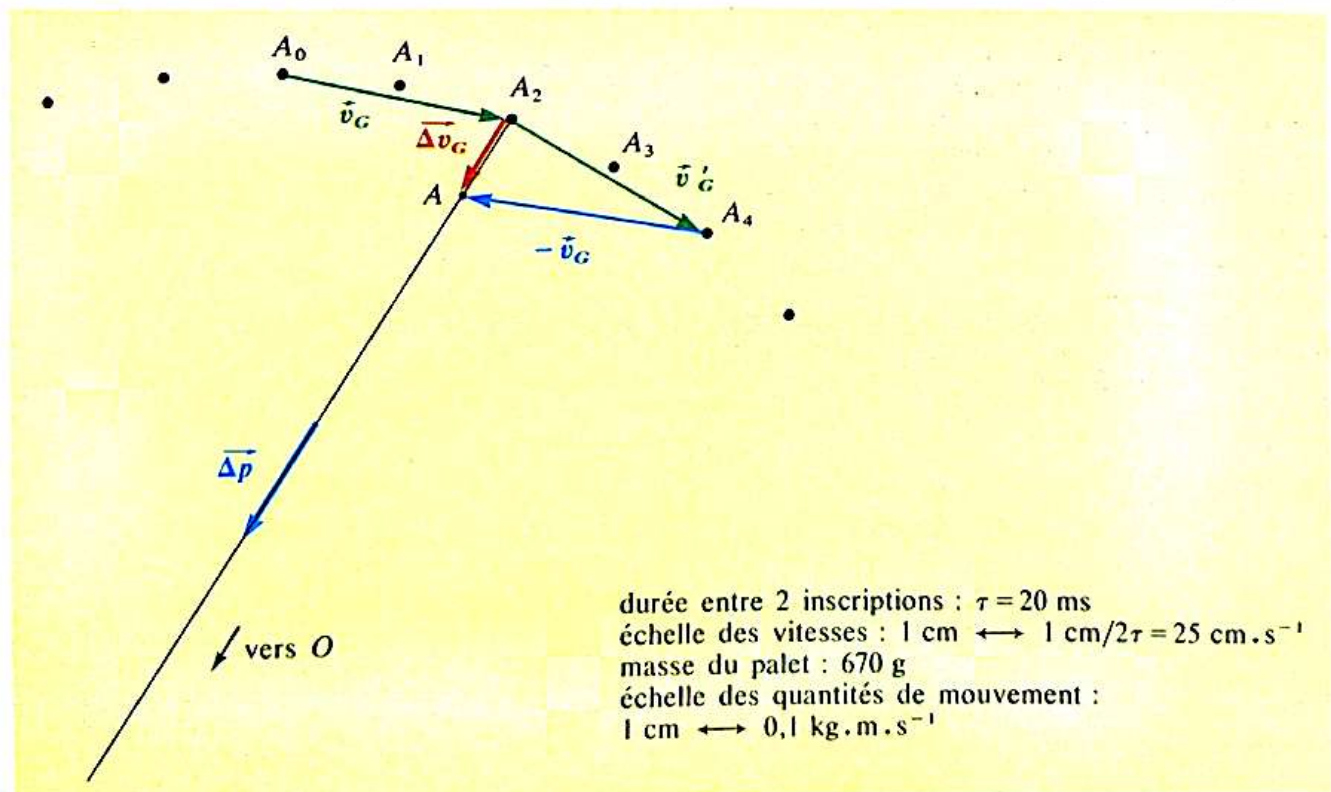
Numériquement :

$$A_2A = 0,9 \text{ cm},$$

$$\text{d'où } \|\Delta\vec{v}_G\| = 0,9 \times 25 = 22,5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}.$$

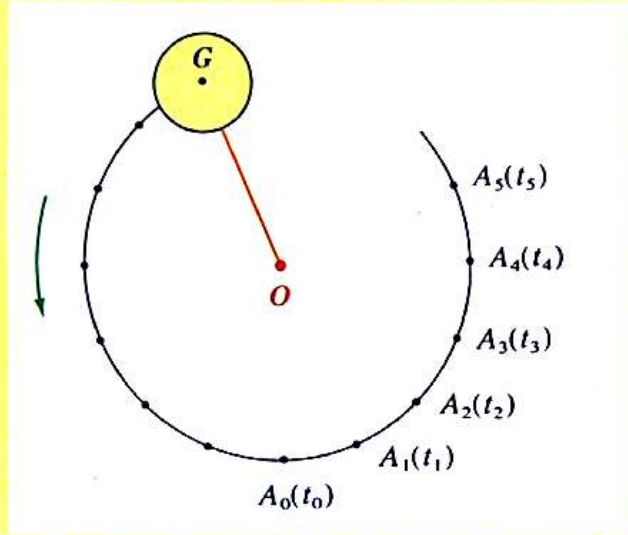
$$\|\Delta\vec{p}\| = m \cdot \|\Delta\vec{v}_G\| = 0,670 \times 0,225 = 0,151 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$\Delta\vec{p}$ sera représenté, à l'échelle, par un vecteur du plan de $\frac{0,151}{0,1} \approx 1,5 \text{ cm}$ de longueur.



Application :

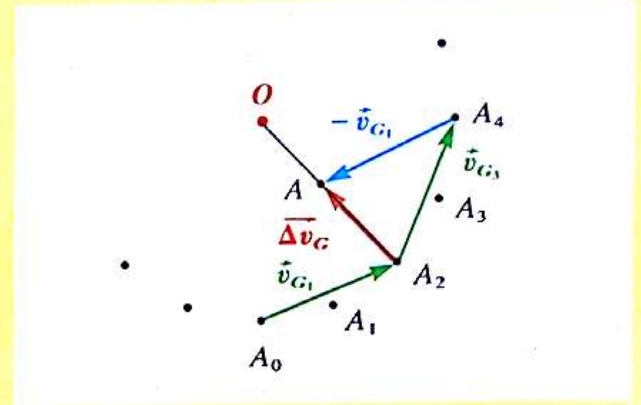
On a reproduit ci-dessous l'enregistrement du mouvement du centre d'inertie G d'un palet sur une table à coussin d'air horizontale. Ce palet est relié à un point fixe O de la table par une ficelle. Le marquage des positions A_1, A_2, A_3, \dots de G est fait à intervalles de temps successifs égaux.



- 1/ Quelle est la nature du mouvement de G ?
 - 2/ Déterminer entre les instants t_1 et t_3 la variation de quantité de mouvement $\Delta \vec{p}$. Conclure.
- 1/ Les positions A_1, A_2, A_3, \dots du centre d'inertie du palet sont situées sur un cercle de centre O .

Les points étant équidistants et la durée étant la même entre deux marquages successifs, le mouvement de G est circulaire uniforme.

2/ $\Delta \vec{p} = m \cdot \Delta \vec{v}_G$ a la direction et le sens de $\Delta \vec{v}_G$. Déterminons $\Delta \vec{v}_G$ au point A_2 entre les instants t_1 et t_3 . Avec l'échelle choisie, \vec{v}_{G1} , vecteur vitesse de G à la date t_1 (en A_1), est représenté par le vecteur $\vec{A_0A_2}$; le vecteur vitesse \vec{v}_{G3} , à la date t_3 (en A_3) est représenté par le vecteur $\vec{A_2A_4}$.



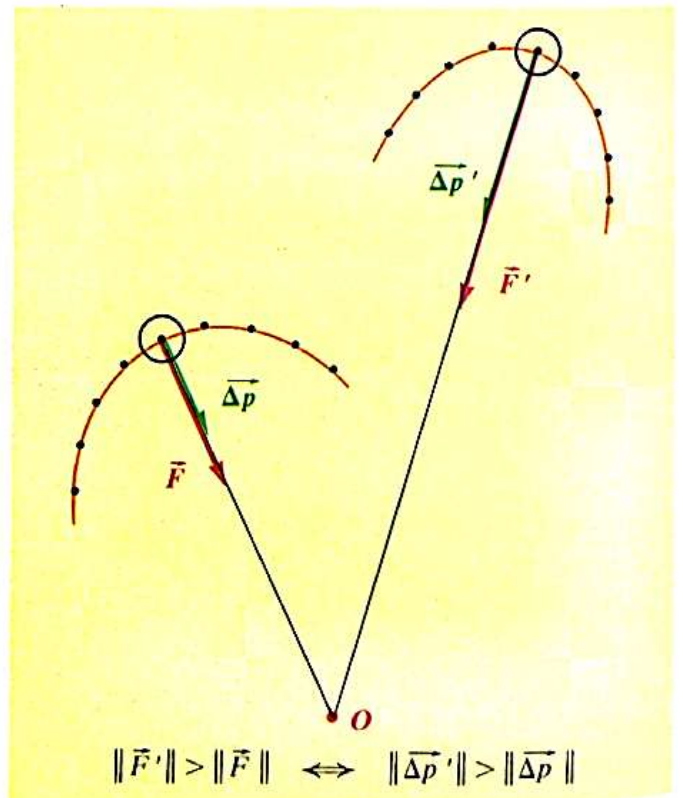
$\Delta \vec{v}_G = \vec{v}_{G3} - \vec{v}_{G1}$ est la variation du vecteur vitesse du centre d'inertie G entre les dates t_1 et t_3 très proches et encadrant la date t_2 (position A_2); $\Delta \vec{v}_G$ est représenté par le vecteur $\vec{A_2A} = \vec{A_2A_4} - \vec{A_0A_2}$. $\Delta \vec{v}_G$ est dirigé vers O ; $\Delta \vec{v}_G$ et donc $\Delta \vec{p}$ ont la direction et le sens de la force \vec{F} non compensée, exercée par la ficelle tendue sur le palet à l'instant t_2 (en A_2).

19.2.2 \vec{F} et $\Delta \vec{p}$ varient de la même façon

Considérons à nouveau l'expérience précédente, en lançant plus fort le palet. L'élastique se tend davantage et la trajectoire est plus incurvée.

Nous pouvons, de la même façon, déterminer $\Delta \vec{p}$ en un point où l'élastique est plus tendu (fig. 3).

Nous constatons que la variation de quantité de mouvement est d'autant plus grande en module, que la force exercée par l'élastique est plus importante.

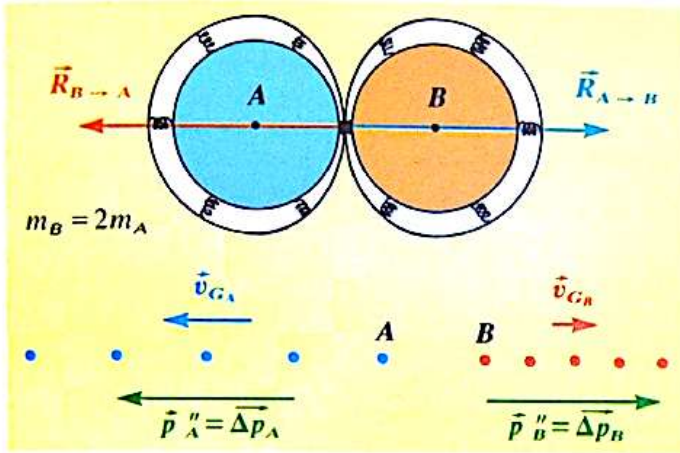


3. Plus l'élastique est tendu, et plus la variation de la quantité de mouvement du palet est grande.

19.3 interaction et transfert de quantité de mouvement

Reprenons l'expérience de l'éclatement (chapitre 18) de deux mobiles A et B . Nous savons que :

- avant l'éclatement : $\vec{p}'_A = \vec{p}'_B = \vec{0}$;
- après l'éclatement : $\vec{p}''_A = -\vec{p}''_B$.



Nous en déduisons, avec

$$\Delta \vec{p}_A = \vec{p}''_A - \vec{p}'_A \text{ et } \Delta \vec{p}_B = \vec{p}''_B - \vec{p}'_B :$$

$$\Delta \vec{p}_A = -\Delta \vec{p}_B.$$

Il y a eu transfert de quantité de mouvement entre les deux solides.

Plaçons-nous à l'instant de l'éclatement.

Le mobile A exerce sur le mobile B une force $\vec{R}_{A \rightarrow B}$ qui provoque la variation $\Delta \vec{p}_B$ de la quantité de mouvement du mobile B .

Réciproquement, le mobile B exerce sur le mobile A une force $\vec{R}_{B \rightarrow A}$ qui provoque la variation $\Delta \vec{p}_A$ de la quantité de mouvement du mobile A .

Le Principe d'interaction indique que :

$$\vec{R}_{B \rightarrow A} = -\vec{R}_{A \rightarrow B}.$$

La relation : $\Delta \vec{p}_A = -\Delta \vec{p}_B$

est donc bien en accord avec ce principe.



4. Une hélice transfère une quantité de mouvement à l'eau; inversement, l'eau transfère, via l'hélice, une quantité de mouvement au bateau, ce qui a pour effet de le propulser. Il y a transfert de quantité de mouvement entre l'eau et le bateau.



5. En se refermant, les coquilles Saint-Jacques expulsent de l'eau, et se propulsent ainsi par réaction. Il y a transfert de quantité de mouvement entre l'eau expulsée et la coquille. De nombreux animaux marins se propulsent de cette façon.

19.4 forces extérieures et intérieures à un système

La force $\vec{F}_{L \rightarrow C}$, exercée par une laisse sur un chien, est une force extérieure appliquée au chien, choisi comme système étudié.

La force $\vec{F}_{M \rightarrow L}$, exercée par le maître sur la laisse, est une force extérieure appliquée au système {chien et laisse}.

En considérant toujours le système {chien et laisse}, les forces $\vec{F}_{L \rightarrow C}$, et $\vec{F}_{C \rightarrow L}$, correspondant à l'interaction chien \leftrightarrow laisse, sont dites, «forces intérieures» au système. En vertu du Principe d'interaction, ces forces sont directement opposées et annulent leurs effets. Elles ne peuvent provoquer aucune variation de la quantité de mouvement du système {chien et laisse}, et donc modifier le mouvement du centre d'inertie de ce système, puisque leur somme est nulle.

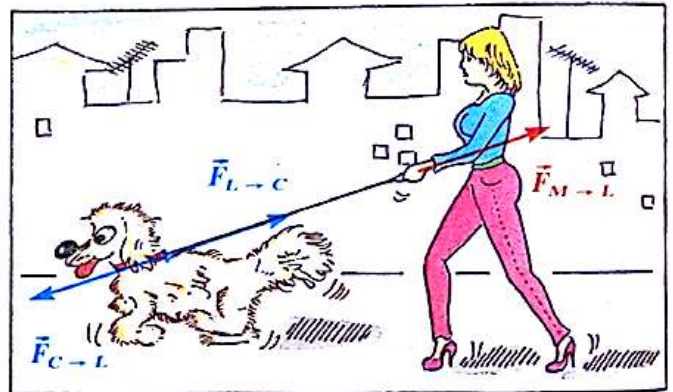
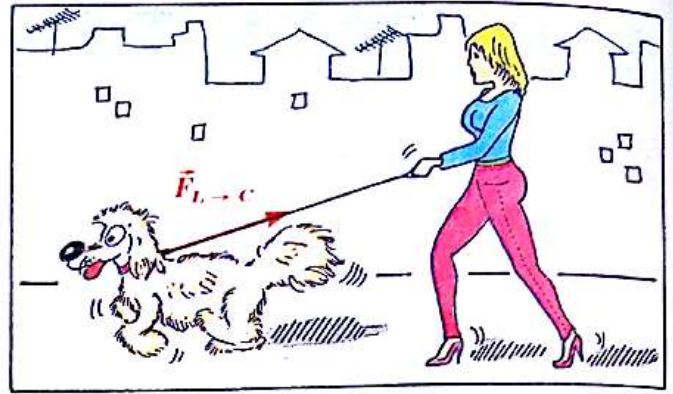
- Les forces intérieures correspondent à des interactions entre les éléments constituant le système considéré; elles s'annulent deux à deux.

En particulier, dans un solide, ce sont les forces intérieures qui assurent sa cohésion.

En considérant toujours le système {chien et laisse}, il n'en est pas de même de la force $\vec{F}_{M \rightarrow L}$: une force extérieure correspond à une interaction entre l'un des éléments du système et un élément extérieur.

Seules les forces extérieures appliquées à un système peuvent en modifier la quantité de mouvement.

- Le vecteur $\Delta \vec{p} = m \cdot \Delta \vec{v}_G$, variation du vecteur quantité de mouvement d'un solide (plus généralement d'un système) entre deux instants proches, a la direction et le sens du vecteur \vec{F} , somme vectorielle des forces extérieures appliquées au solide (au système) entre ces deux instants.



6. Pourquoi Gaston ne peut-il pas faire reculer son bateau en tirant très fortement sur une corde fixée à l'étrave?

DOCUMENT

Fusées et quantité de mouvement

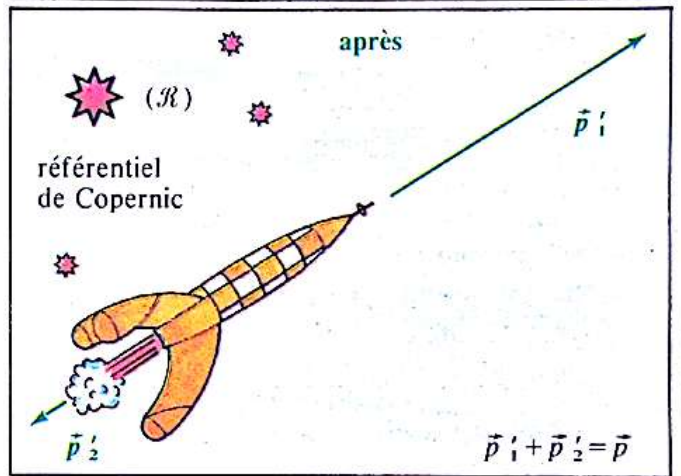
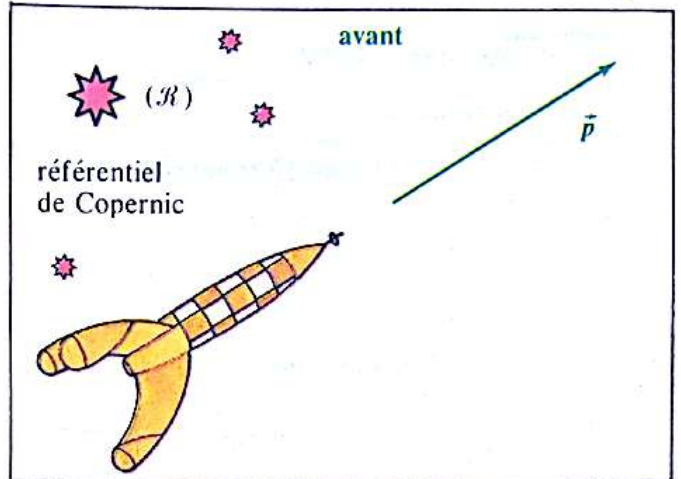
Au chapitre 16, nous avons déjà donné le principe de fonctionnement d'une fusée, fondé sur l'interaction entre les gaz éjectés et la fusée.

Reprenons l'étude de ce mode de propulsion en considérant maintenant la notion de quantité de mouvement. Pour simplifier, nous supposons la fusée isolée. Le système constitué par la fusée et son propergol à l'instant t , en éjectant des gaz de combustion, « produit » de la quantité de mouvement, dirigée vers l'arrière de la fusée.

Comme le système considéré doit garder une quantité de mouvement constante, il doit y avoir apparition d'une quantité de mouvement dirigée vers l'avant, et compensant la précédente. Cette variation de quantité de mouvement correspond à une augmentation de la vitesse de la fusée.

Cette seconde interprétation, comparée à la première qui se fondait sur le Principe d'interaction, montre bien qu'il existe effectivement une relation entre les forces et les variations de quantité de mouvement. De même que la réaction est opposée à l'action, la quantité de mouvement « éjectée » avec les gaz est opposée à celle gagnée par la fusée.

Pour établir ce dernier résultat, nous avons supposé la fusée isolée mécaniquement. En fait la propriété demeure dans le cas contraire (le Principe d'interaction est d'ailleurs général) : En présence des forces extérieures (par exemple, une fusée en ascension verticale et soumise à son poids), l'éjection des gaz agit toujours de façon à transférer à la fusée une quantité de mouvement, exactement opposée à celle des gaz, et qui augmente sa vitesse; mais cette augmentation de vitesse est contrariée par l'action du poids de la fusée.

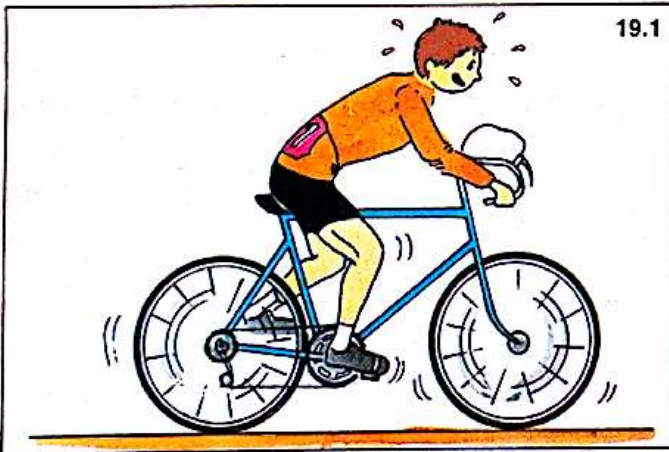


Faire le point

- Lorsque des forces appliquées à un solide ne se compensent pas :
 - le solide est-il pseudo-isolé?
 - le mouvement de son centre d'inertie est-il rectiligne uniforme?
 - y a-t-il une relation entre leur somme \vec{F} et $\Delta\vec{p}$?
- Que peut-on dire de la somme des forces intérieures à un système?
- Que peut-on dire de la somme des forces extérieures appliquées à un solide qui n'est pas pseudo-isolé?

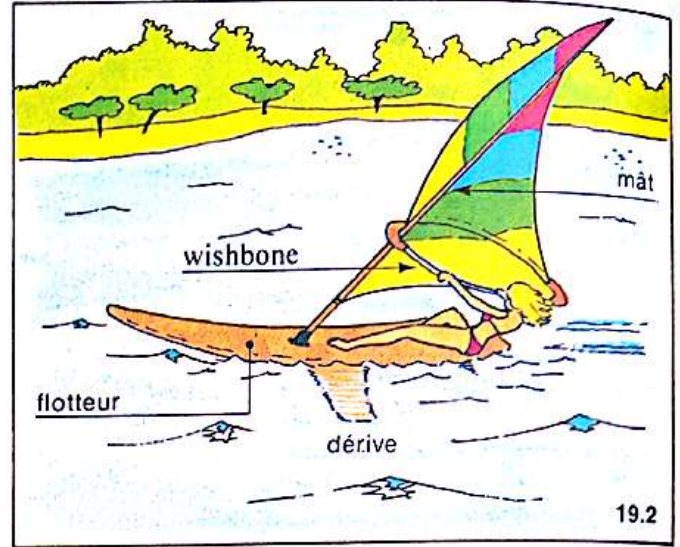
Forces intérieures - Forces extérieures

- 19.1** 1/ On considère le système {cycliste+vélo}. Quelles sont les forces extérieures appliquées au système?
- 2/ On prend comme système la bicyclette. Quelles sont les forces extérieures appliquées à la bicyclette?
- 3/ Peut-on dire que ce sont les forces exercées par le cycliste sur les pédales qui provoquent la variation $\Delta\vec{p}$ de la quantité de mouvement de l'ensemble {cycliste+vélo}. Sinon, quelles sont ces forces?



- 19.2** 1/ Le grément de la planche à voile {mât, wishbone, voile} est le système que l'on étudie. Classer dans les catégories : forces intérieures, forces extérieures, autres forces, les actions suivantes :
- force exercée par le planchiste sur le wishbone;
 - force exercée par le planchiste sur le flotteur;
 - force exercée par le flotteur sur le mât;
 - force exercée par l'eau sur la dérive;
 - force exercée par le mât sur la voile;
 - force exercée par le vent sur la voile;
 - force exercée par le wishbone sur le mât;
 - poids du véliplanchiste;
 - poids du mât, de la voile, du wishbone;
 - poids du flotteur.

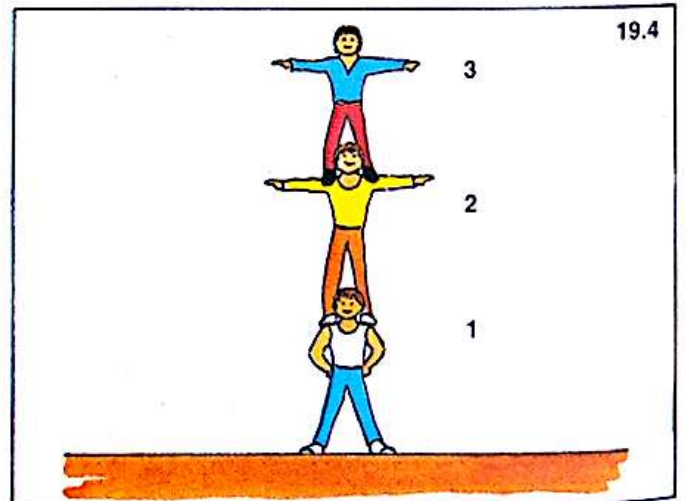
2/ Reprendre la même question en considérant comme système le wishbone.



19.3 Un athlète soulève des haltères.

- 1/ On prend comme système les haltères. Quelles sont les forces extérieures appliquées à ce système?
- 2/ On prend comme système l'haltérophile. Quelles sont les forces extérieures appliquées à ce système?
- 3/ On prend maintenant le système {haltérophile+haltères}. Quelles sont les forces extérieures appliquées à ce système? Citer des forces intérieures.
- 4/ Lorsque l'athlète se soulève, sa variation de quantité de mouvement est dirigée vers le haut. Quelles sont les forces extérieures à l'athlète qui lui permettent de modifier sa quantité de mouvement?

- 19.4** Faire successivement le bilan des forces exercées sur :
- l'équilibriste n° 1;
 - l'équilibriste n° 2;
 - l'équilibriste n° 3;
 - l'ensemble des trois équilibristes.



19.5 Prenons comme système un voilier et envisageons plusieurs situations.

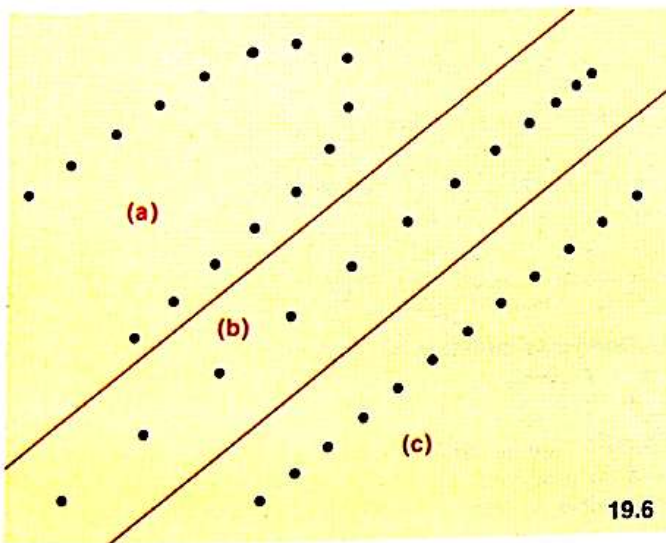
- 1/ Il n'y a pas de vent; le voilier est au repos. Que peut-on dire des actions extérieures subies par le voilier? Quelle est la direction des actions qu'exerce l'eau sur le voilier?
- 2/ Le vent souffle; au début de son mouvement, le voilier accélère en ligne droite. L'eau exerce des forces de

frottement qui s'opposent au mouvement. Tracer approximativement la direction des différentes forces extérieures appliquées au voilier. Quelle est la direction de la somme vectorielle de ces forces?

3/ Il arrive un moment où la vitesse du voilier est telle qu'elle reste constante; le centre d'inertie décrit une trajectoire rectiligne uniforme. Quelles sont les forces extérieures qui se compensent? Illustrer par un schéma.



19.6 On a reproduit différents enregistrements du mouvement du centre d'inertie d'un mobile autoporteur sur coussin d'air. Indiquer le ou les cas où le mobile n'est pas pseudo-isolé? Justifier votre réponse.



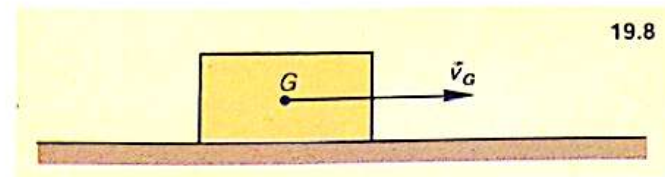
19.7 Au cours d'un saut, le mouvement d'un parachutiste peut être considéré comme curviligne accéléré ou rectiligne uniforme.

1/ Pour quel type de mouvement la variation du vecteur quantité de mouvement du parachutiste est-elle nulle?

2/ Dans le second cas, faire le bilan des forces extérieures appliquées au parachutiste. Que peut-on dire de la somme de ces forces? Faire un schéma.

19.8 1/ Un bloc de poids \vec{P} glisse sur un plan horizontal parfaitement lisse. Son mouvement est un mouvement de translation rectiligne uniforme. Que peut-on dire de la variation de sa quantité de mouvement \vec{p}

entre deux instants? Quelle est la direction de la somme \vec{R} des forces de contact qu'exerce le plan sur la face inférieure du bloc?



2/ Ce bloc glisse maintenant vers le bas d'un plan incliné parfaitement lisse. Son mouvement est un mouvement rectiligne accéléré. L'action de contact du sol \vec{R} est toujours perpendiculaire au plan (pas de frottement). Par rapport à la question précédente, l'intensité de la réaction \vec{R} a-t-elle été modifiée?

3/ Le bloc arrive sur une partie rugueuse du plan; il est ralenti; son mouvement est tel que la variation de sa quantité de mouvement $\Delta\vec{p}$ est dirigée vers le haut du plan incliné, parallèlement au plan. Par rapport à la direction verticale, préciser la direction de \vec{R} .

4/ Sur le plan rugueux, le bloc s'arrête définitivement: au repos, $\Delta\vec{p} = \vec{0}$. Que peut-on dire de la réaction \vec{R} des actions de contact du plan incliné rugueux sur le bloc? Y a-t-il une différence avec le cas de la première question où le plan est lisse?

19.9 A grande vitesse, un motocycliste doit nettement se pencher vers l'intérieur d'un virage pour ne pas être déséquilibré. Si on admet que sa variation de quantité de mouvement dans le virage est dirigée horizontalement vers le centre du virage, quelle est approximativement la direction de la somme des actions de contact qu'exerce le sol sur les roues?



19.10 Moteur débrayé, sur une route horizontale et droite, une automobile finit par s'arrêter.

1/ Indiquer sur un schéma la direction et le sens de la variation de la quantité de mouvement $\Delta\vec{p}$ du véhicule; indiquer sur le même schéma la direction et le sens de la somme \vec{F} des forces extérieures appliquées à l'automobile au cours du ralentissement.

2/ Après avoir schématisé le poids du véhicule, indiquer approximativement le sens de la somme \vec{R} des actions de contact du sol sur les roues. Nous admettrons que l'action de l'air sur la carrosserie est une force de même direction que la vitesse du véhicule mais de sens opposé. C'est essentiellement cette action qui provoque le ralentissement.

3/ L'automobile est maintenant dans une phase d'accélération; le moteur actionne les roues. Reprendre les questions 1 et 2 pour ce mouvement.

4/ L'automobile atteint un régime uniforme : son mouvement est rectiligne uniforme. Reprendre les questions 1 et 2 pour ce nouveau type de mouvement.

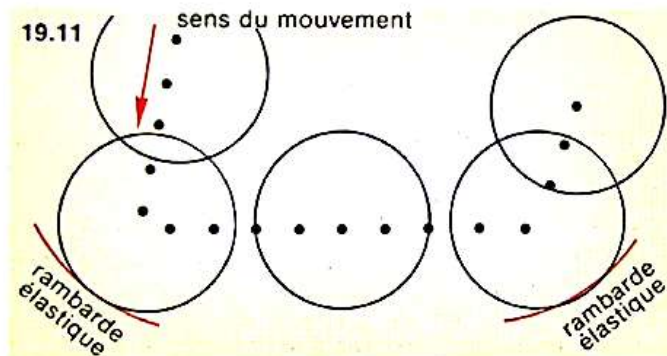
5/ L'automobile est au repos. L'action de l'air sur la carrosserie est négligeable. Reprendre les questions 1 et 2 pour ce cas particulier.

19.11 Reproduire la trajectoire du mobile *S* figurée ci-dessous.

1/ Représenter la quantité de mouvement \vec{p} du solide avant le premier choc sur la rambarde élastique, \vec{p}' après ce premier choc, \vec{p}'' après le second choc. Représenter les variations $\Delta\vec{p} = \vec{p}' - \vec{p}$ et $\Delta\vec{p}' = \vec{p}'' - \vec{p}'$. On précisera l'échelle de représentation.

2/ L'action de la rambarde sur le mobile provoque une variation de sa quantité de mouvement. Peut-on caractériser la direction et le sens de cette action?

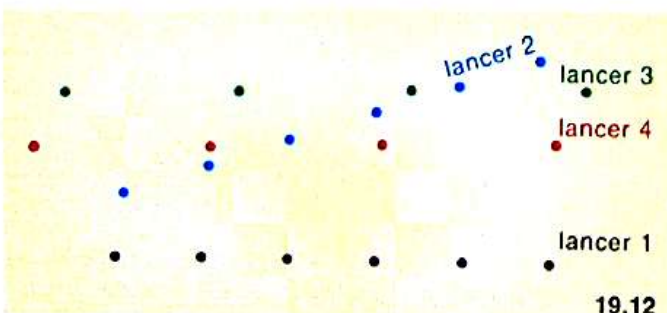
3/ Peut-on caractériser l'action du mobile sur la rambarde? Que provoque cette action?



19.12 Pour lancer un mobile *S* de masse *m* sur une table à coussin d'air, nous disposons d'un lanceur comportant un ressort que l'on peut comprimer plus ou moins. La brusque détente du ressort permet de donner une impulsion au mobile et de lui communiquer une certaine quantité de mouvement. La figure ci-dessous représente les enregistrements obtenus pour quatre lancers différents du même mobile avec le même lanceur.

1/ Comparer les vecteurs quantité de mouvement du mobile; comparer leurs mesures. Que peut-on dire concernant les différentes forces exercées par le lanceur sur le mobile lors des différents lancers? Certaines de ces forces sont-elles égales?

2/ Quelles modifications a-t-on apportées au réglage du lanceur entre chaque lancer (compression du ressort, orientation du lanceur, etc.)?



Forces et quantité de mouvement : étude quantitative

19.13 Au cours d'un démarrage, la vitesse d'une automobile s'accroît de 1,2 m chaque seconde. Sachant que sa masse est égale à 680 kg, en déduire, par seconde, sa variation de quantité de mouvement.

19.14 Au cours d'un essai de freinage, avec une Peugeot 205, on a relevé les mesures suivantes :

<i>v</i>	100 km.h ⁻¹	80 km.h ⁻¹	60 km.h ⁻¹	40 km.h ⁻¹	20 km.h ⁻¹
<i>t</i>	0	2 s	4 s	6 s	8 s

1/ Tracer $v = f(t)$, avec *v* en m.s⁻¹.

2/ Que peut-on dire de la variation de la vitesse au cours du temps?

3/ Sachant que la masse du véhicule est égale à 720 kg, calculer la variation de quantité de mouvement par seconde de cette automobile.

19.15 Un mobile sur coussin d'air a laissé les traces suivantes (durée entre deux inscriptions : 20 ms, masse du mobile : 700 g) :



1/ Calculer $v(t_1)$ et $v(t_3)$.

2/ En déduire et tracer $\Delta\vec{v}(t_2)$, variation du vecteur vitesse entre les dates t_1 et t_3 ; échelle de représentation : 1 cm \leftrightarrow 0,125 m.s⁻¹.

3/ Représenter $\Delta\vec{p}(t_2)$, variation du vecteur quantité de mouvement entre les dates t_1 et t_3 ; échelle de représentation : 1 cm \leftrightarrow 0,060 kg.m.s⁻¹.

4/ Donner la direction de la somme des forces s'exerçant sur le mobile.

19.16 Sur la table à coussin d'air, le centre d'inertie *G* d'un mobile autoporteur laisse les traces suivantes à intervalles de temps $\tau = 40$ ms. L'échelle du dessin est de 1/5.



1/ Calculer et tracer le vecteur vitesse de G aux dates t_2 et t_3 ; $1 \text{ cm} \leftrightarrow 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

2/ Tracer à la date t_2 , la variation $\Delta \vec{v}_G$ du vecteur vitesse.

3/ La masse du mobile est égale à 700 g. En déduire la variation de la quantité de mouvement à la date t_3 . Tracer $\Delta \vec{p}(t_3)$; $1 \text{ cm} \leftrightarrow 0,5 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

4/ Pourquoi ce solide n'est-il pas pseudo-isolé? Quelle est, à la date t_3 , la direction de la somme des forces s'exerçant sur lui?

19.17 La figure ci-contre reproduit à l'échelle 1/5 l'enregistrement réel du mouvement du centre d'inertie G d'un palet lancé sur une table à coussin d'air horizontale. Ce palet est relié à un point fixe O de la table par une ficelle.

1/ Quelle est la nature du mouvement de G ?

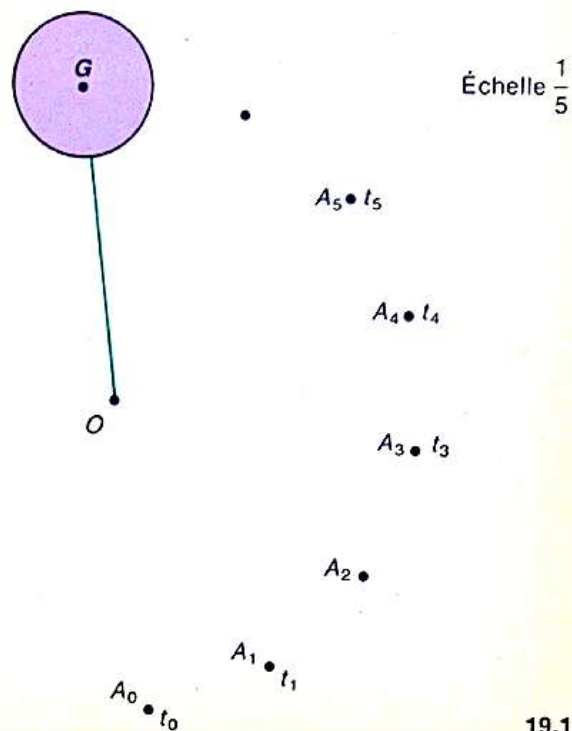
2/ Tracer en A_4 la variation de quantité de mouvement entre les dates t_3 et t_5 . Conclure.

Données : masse du palet $m = 0,800 \text{ kg}$; durée entre deux inscriptions : $\tau = 20 \text{ ms}$; échelle des quantités de mouvement : $1 \text{ cm} \leftrightarrow 0,8 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

19.18 Un palet est attaché à un élastique fixé en un point O de la table à coussin d'air. L'élastique est tendu et le palet lâché. La figure ci-dessous donne la position du centre d'inertie G du palet, à intervalles de temps réguliers $\tau = 20 \text{ ms}$, à partir d'une position A_0 de G ; $A_0O = 73 \text{ cm}$.

1/ Calculer $v(t_2)$, $v(t_4)$ et calculer la variation de la vitesse entre les dates t_2 et t_4 .

2/ Si le palet a une masse de 800 g, tracer en A_3 la



19.17

variation $\Delta \vec{p}$ du vecteur quantité de mouvement entre les dates t_2 et t_4 .

3/ Sachant que l'élastique non tendu a une longueur de 20 cm et une raideur $k = 16 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, calculer l'intensité de la force \vec{F} exercée par l'élastique sur le palet à la date t_3 (encadrant t_2 et t_4).

4/ Comparer \vec{F} et $\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$ (F exprimée en N, $\Delta \vec{p}$ en $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ et Δt en s).



19.18

Équilibre d'un solide soumis à deux forces

20.1 généralités

La branche de la mécanique dont le but est l'étude de l'équilibre des corps s'appelle la *statique*. L'équilibre, c'est-à-dire l'immobilité d'un corps, est jugé par rapport à la Terre et aux structures (bâtiments, édifices...) liés fixement à celle-ci, et qui constituent le « référentiel terrestre ».

Nous allons rechercher les conditions d'équilibre d'un solide soumis à plusieurs forces(*).

Pour bien mener notre étude, il serait intéressant de disposer initialement d'un solide mécaniquement isolé (soumis à aucune force), puis de lui appliquer des forces de caractéristiques bien connues. Or, sur Terre, un solide ne peut être mécaniquement isolé : il est inexorablement soumis aux forces de pesanteur. Nous pouvons pallier cette difficulté en étudiant :

- un solide sur une table à coussin d'air, horizontale; les effets de la pesanteur sont alors compensés à chaque instant par l'action du coussin d'air : le solide est pseudo-isolé;
- un solide de poids très faible, négligeable devant les autres forces appliquées; des morceaux de carton, de polystyrène expansé ou de liège peuvent convenir.

20.2 conditions nécessaires d'équilibre d'un solide soumis à deux forces

Un solide S de poids négligeable est soumis à l'action simultanée de deux fils tendus liés à des dynamomètres. L'étude expérimentale menée ci-contre montre que lorsque le solide est en équilibre les deux forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 , respectivement localisées ponctuellement en A et B et exercées par les fils tendus, ont nécessairement :

- un même support (ou droite d'action);
- des sens opposés;
- une même intensité : $\|\vec{F}_1\| = \|\vec{F}_2\|$.

Ces deux dernières conditions permettent de poser :

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$$



(*) Nous pouvons déjà prévoir qu'à l'équilibre, la variation de quantité de mouvement du solide étant nulle ($\Delta\vec{p} = \vec{0}$), la somme des forces appliquées sera nulle.

• Lorsqu'un solide soumis à deux forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 est en équilibre, nécessairement :

1. La somme vectorielle des deux forces est nulle :

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{0}.$$

Cette première condition est nécessaire à l'immobilité du centre d'inertie G (si elle n'est pas satisfaite, \vec{v}_G varie, cf. chapitre 19).

2. Les forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 ont même support.

La première condition étant satisfaite, cette seconde condition est nécessaire à l'absence de rotation propre.

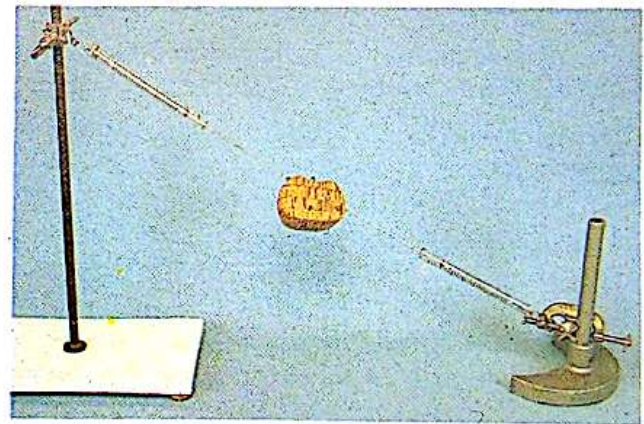
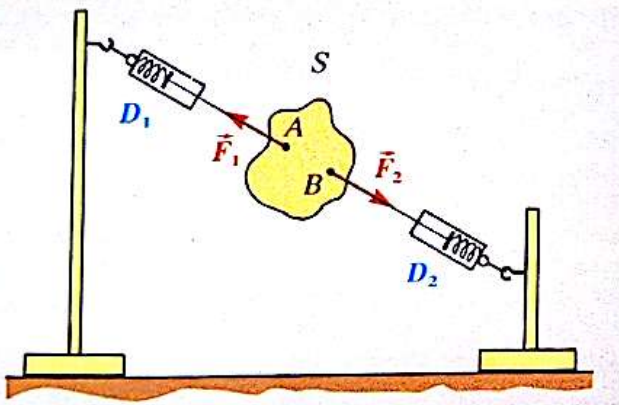
On dit parfois que les deux forces sont « directement opposées », pour signifier qu'elles sont opposées et ont même support.

Si l'une des deux conditions ci-dessus n'est pas satisfaite, le solide ne peut pas être en équilibre.

Ces conditions sont nécessaires mais non suffisantes pour que le solide soit en équilibre; soumis à deux forces directement opposées, un solide (alors pseudo-isolé) peut en effet avoir son centre d'inertie G animé d'un mouvement rectiligne uniforme et aussi un mouvement propre de rotation autour de G (voir paragraphe 20.5)

Fiche expérimentale

équilibre d'un solide soumis à deux forces



Un morceau de liège S est maintenu au repos à l'aide de deux dynamomètres. Le poids de S est négligeable devant les deux forces localisées (A, \vec{F}_1) et (B, \vec{F}_2) exercées par les deux fils.

A l'équilibre nous constatons que :

- les deux brins de fil qui relient les points d'attache A et B du solide S aux dynamomètres sont dans le prolongement l'un de l'autre : les vecteurs forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 ont même support AB ;
- les dynamomètres donnent la même indication; en admettant qu'ils mesurent l'intensité des forces exercées par les brins, on en conclut que ces deux forces ont même intensité : $F_1 = F_2$;

— enfin, il va de soi que le dynamomètre D_1 tire le solide S vers la gauche alors que D_2 le tire vers la droite : autrement dit, les deux forces ont des sens opposés.

Résumons :

- les deux forces ont même direction, des sens opposés et même intensité :

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{0}$$

- les deux forces ont même droite d'action.

Ces résultats expriment les conditions nécessaires à l'équilibre d'un solide soumis à deux forces.

20.3 poids et centre de gravité

Suspendons une plaque de contre-plaqué par un fil (fig. 1). Ce solide est soumis :

- à l'action du fil exercée en A ; la force correspondante \vec{F} , appelée encore *tension du fil*, a pour support le fil dont la direction à l'équilibre définit la verticale du lieu ;
- aux forces de pesanteur, forces réparties dans tout le volume du solide.

Les conditions nécessaires d'équilibre montrent que les forces réparties de pesanteur sont équivalentes à une force unique \vec{P} , appelée *poids du corps*, telle que :

- $\vec{F} + \vec{P} = \vec{0}$;
- \vec{F} et \vec{P} ont même support.

La droite d'action de \vec{P} est donc confondue avec celle de \vec{F} , matérialisée par la direction du fil tendu. Traçons cette droite Δ_1 sur la plaque (fig. 1 a).

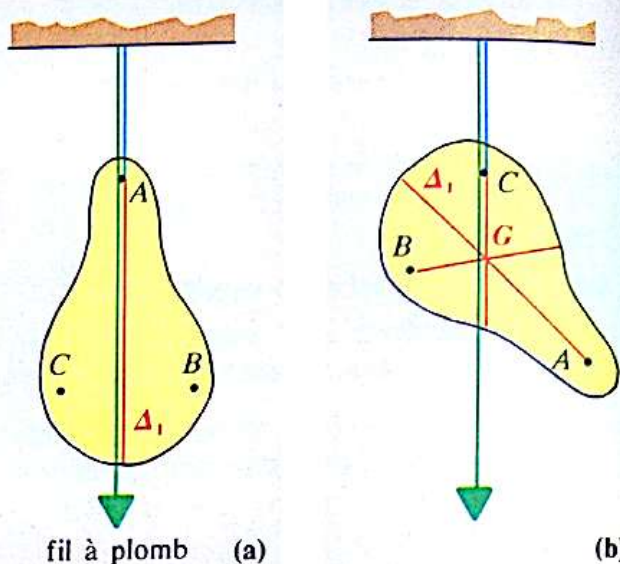
Changeons plusieurs fois de point d'attache et traçons chaque fois le prolongement du fil tendu. Nous constatons que tous les segments de droite se coupent en un même point (fig. 1 b).

Le poids \vec{P} du corps peut donc être considéré comme un vecteur force appliquée en ce point que nous avons appelé (*paragraphe 15.3*) *centre de gravité* et noté G. Ce point est aussi le centre d'inertie du solide (chapitre 17).

- L'action, sur un corps, des forces réparties de pesanteur est équivalente à celle d'une force unique localisée, appelée *poids du corps* et appliquée au centre de gravité G.

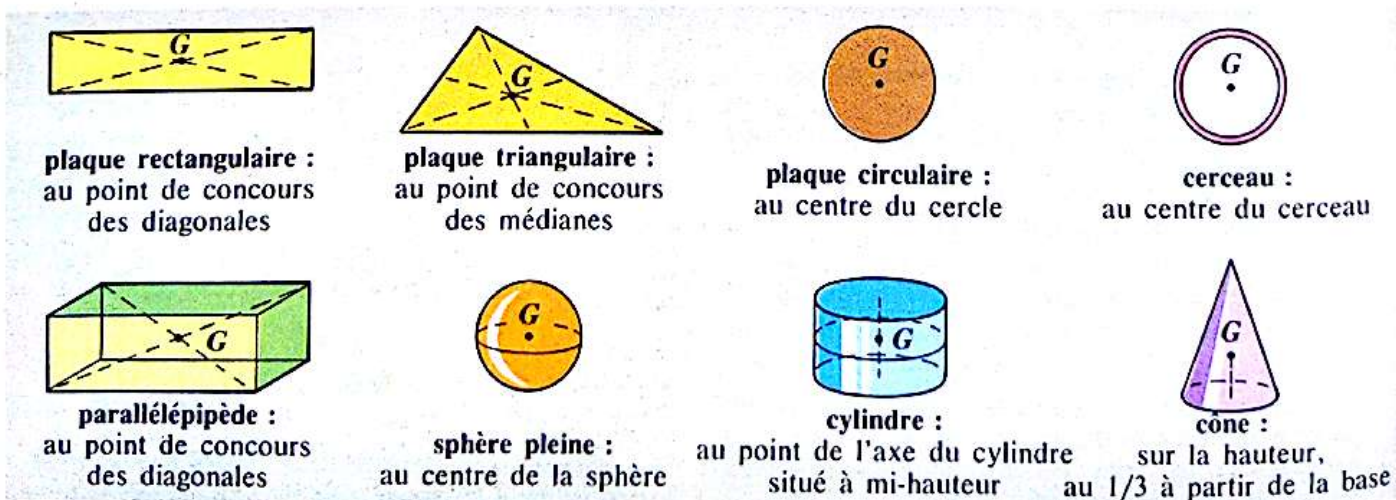
Mais il est bien entendu que les forces de pesanteur ne sont pas réellement concentrées en G et ne s'exercent pas sur ce seul point ! Il ne s'agit que d'une équivalence.

La figure 2 indique la position du centre de gravité d'objets homogènes de forme géométrique simple. Le centre de gravité de l'« objet » peut être situé hors de la matière constituant l'objet (cerceau, par exemple). Si le solide, supposé homogène, possède un centre de symétrie, ce point coïncide avec le centre de gravité.



1. L'action des forces de pesanteur sur un corps est équivalente à un vecteur force appliqué au centre de gravité G de ce corps, et appelé poids du corps.

Remarque : Il importe de bien comprendre qu'il ne s'agit que d'une équivalence d'ordre mathématique. En particulier, si G n'appartient pas à la matière qui constitue l'objet (cerceau, par exemple), l'application d'une force \vec{P} appliquée en G resterait sans effet ! En outre, cette équivalence n'a vraiment d'intérêt que pour un corps indéformable. Par exemple, un fil de ligne à haute tension se courbe sous l'action des forces de pesanteur réparties tout son long (déformabilité du fil). L'effet de déformation du fil serait différent si on remplaçait l'action répartie de la pesanteur par une action localisée représentée par une force unique égale à \vec{P} , appliquée au milieu du fil.



2. Centre de gravité de quelques corps homogènes, de forme géométrique simple.

Application 1 : Équilibre stable, équilibre instable

Une tige rigide AB , de poids $0,2 \text{ N}$, est soumise à l'action de deux forces : (A, \vec{F}_1) et (B, \vec{F}_2) , avec $\|\vec{F}_1\| = 60 \text{ N}$. Donner les caractéristiques de ces deux forces lorsque la tige est en équilibre.

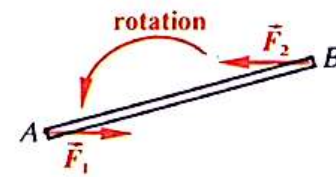
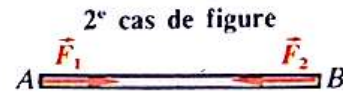
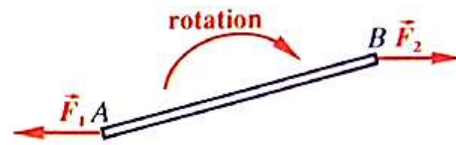
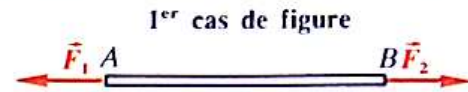
Les forces de pesanteur s'exerçant sur la tige sont négligeables devant l'intensité de la force \vec{F}_1 . Nous pouvons donc considérer que la tige est soumise à l'action de deux forces, \vec{F}_1 et \vec{F}_2 , telle qu'à l'équilibre :

- $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{0}$;
- ces forces ont même support : la droite définie par la tige.

Les deux forces vont donc être dirigées suivant la tige AB , avoir des sens opposés et des normes égales. Deux cas de figure se présentent alors :

1^{er} cas de figure : Si on écarte légèrement la barre de sa position d'équilibre tout en maintenant $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{0}$, la barre est soumise à une action mécanique qui la ramène par une rotation vers sa position d'équilibre : on dit que *l'équilibre est stable*.

2^e cas de figure : Si on modifie légèrement cette position d'équilibre, la barre est soumise à une action mécanique qui l'écarte davantage de cette position : on dit que *l'équilibre est instable*.



0.4

Dans ces deux cas, l'action mécanique est caractérisée par deux forces opposées qui n'ont pas le même support.

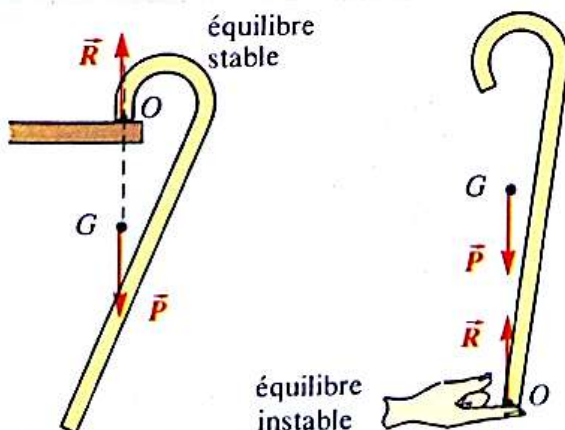
Un tel système de forces est appelé *couple*. Un couple produit un effet de rotation (cf. chapitre 22).

Application 2 : Équilibre d'une canne

Une canne repose sur un support. Le contact de la crosse avec le support est ponctuel (point O). Les forces de contact qu'exerce le support sur la canne sont équivalentes à une force localisée en O . La canne reste dans le plan vertical. Soit G la position de son centre de gravité.

Quelle est la position d'équilibre stable de la canne ?

Le solide est soumis à l'action des forces de contact (O, \vec{R}) et à son poids (G, \vec{P}) .



A l'équilibre :

- $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$;
- les deux forces ont même support : la verticale passant par O .

Si l'on écarte la canne de sa position d'équilibre, elle y revient après quelques oscillations. L'équilibre est dit *stable*. Il est aussi possible de maintenir une canne en équilibre avec son centre de gravité situé au-dessus et à la verticale du point d'appui O . Cet équilibre est évidemment *instable*. Les équilibristes s'adonnent à ce type d'exercice.



20.4 équilibre d'un solide accroché à un ressort

Le système est constitué de trois parties : le corps S , le ressort R et le crochet C (fig. 3). Analysons les forces appliquées au solide S ; celui-ci est soumis (fig. 3 b) :

- aux forces de pesanteur, réparties dans tout le volume de S et équivalentes à une force unique, le poids \vec{P} dont la droite d'action verticale passe par G ;
- à l'action de contact localisée en A , exercée par le ressort R : $\vec{T}_{R \rightarrow S}$.

Écrivons les conditions d'équilibre :

- $\vec{T}_{R \rightarrow S} + \vec{P} = \vec{0}$; (1)
- les deux forces sont portées par la verticale contenant les points A et G .

Appliquons le Principe d'interaction aux forces localisées en A (fig. 3 c) :

$$\vec{T}_{R \rightarrow S} = -\vec{T}_{S \rightarrow R}. \quad (2)$$

Combinons les relations (1) et (2); il vient :

$$\vec{T}_{S \rightarrow R} = \vec{P}.$$

La force de liaison exercée par le solide sur le ressort est égale au poids du solide.

Un dynamomètre, qui mesure l'intensité de la force de liaison, mesure du même coup le poids du solide qui lui est suspendu.

Remarque : Ce résultat devient inexact si le ressort oscille. En effet, $\|\vec{T}_{R \rightarrow S}\|$ varie avec l'allongement, donc varie au cours des oscillations, alors que $\|\vec{P}\|$ reste constant. La raison en est que la relation (1) n'est plus satisfaite puisque le système n'est plus en équilibre. Par contre, on notera que la relation (2) reste vraie, le Principe d'interaction s'appliquant, que le système soit ou non à l'équilibre. Il convient donc de bien distinguer la relation (1), qui exprime la condition nécessaire à l'équilibre, et la relation (2), très générale, qui exprime le Principe d'interaction.

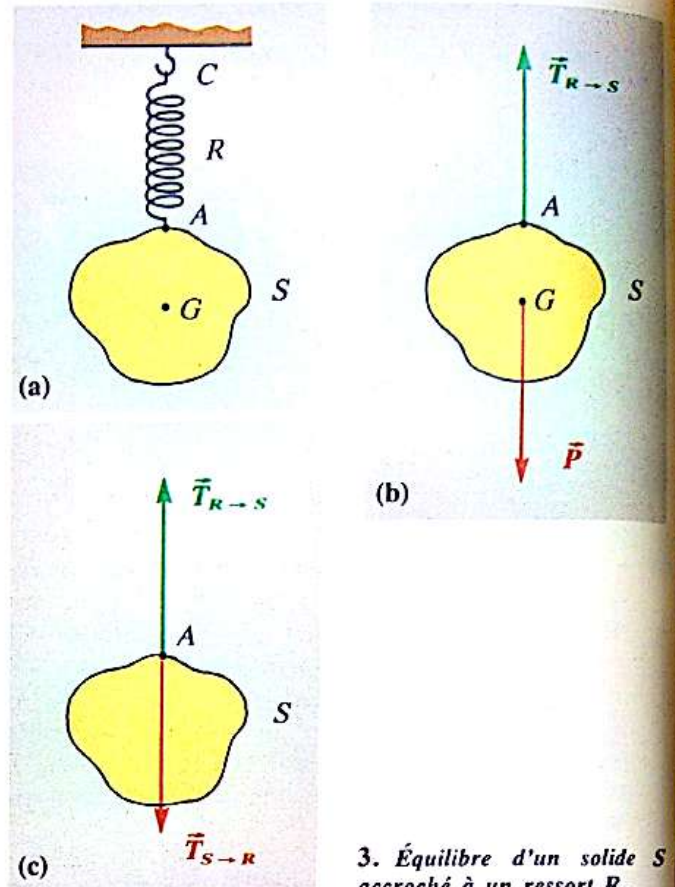
20.5 palet sur coussin d'air

Considérons un palet S en équilibre sur une table à coussin d'air horizontale (fig. 4). Ce solide S est soumis aux forces de pesanteur réparties dans tout le volume, mais équivalentes à une force unique \vec{P} , verticale, appliquée en G . Il est également soumis à des actions exercées par l'air et réparties sur toute la surface de contact. L'équilibre de S a pour conséquence que ces forces sont équivalentes à une force unique, $\vec{F}_{\text{air} \rightarrow S}$, telle que :

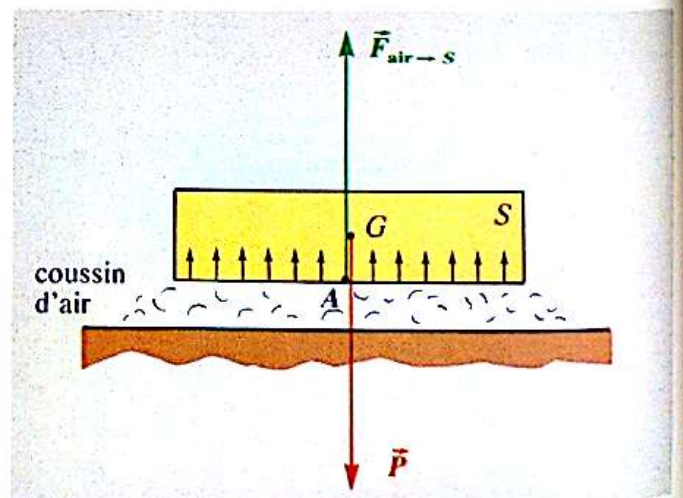
$$\vec{F}_{\text{air} \rightarrow S} + \vec{P} = \vec{0}; \quad (1)$$

$$\vec{F}_{\text{air} \rightarrow S} \text{ et } \vec{P} \text{ ont le même support.} \quad (2)$$

Le point d'application de cette force équivalente n'a pas de signification physique. Conventionnellement, on peut prendre le point A sur la surface de contact et situé sur la verticale passant par G (fig. 4).



3. Équilibre d'un solide S accroché à un ressort R .



4. Les actions exercées par l'air sur le solide S en équilibre sont équivalentes à une force $\vec{F}_{\text{air} \rightarrow S}$ dont le point d'application est ici conventionnellement pris en A sur la surface inférieure de S .

Si nous lançons le palet, nous observons un mouvement rectiligne uniforme de son centre d'inertie G et généralement une rotation propre autour de G . Nous pouvons donc écrire, puisque \vec{v}_G est un vecteur constant, que la variation de quantité de mouvement est nulle : $\Delta\vec{p} = \vec{0}$. La somme des forces appliquées au palet est donc nulle, et nous avons encore :

$$\vec{F}_{\text{air} \rightarrow S} + \vec{P} = \vec{0}.$$

Cela nous amène à deux remarques importantes :

- nous vérifions ainsi que les relations (1) et (2) ne sont pas suffisantes à l'équilibre;
- en mouvement, la réaction de l'air sur le palet reste perpendiculaire à la surface de contact.

• Plus généralement, lorsqu'il n'y a pas de frottement, les forces de contact sont perpendiculaires à la surface de contact.



5. Malgré la mise en mouvement, la réaction du coussin d'air sur l'overcraft reste perpendiculaire à la surface de contact, et par la-même compense l'effet du poids de l'engin.

Application 3 :

Un solide est suspendu par un fil de poids négligeable à un dynamomètre (a). En appliquant les conditions d'équilibre et le Principe d'interaction, montrer que la force exercée par le fil sur le dynamomètre est égale aux poids du solide suspendu.

Analysons les forces appliquées au solide S ; il est soumis (b) à :

- son poids \vec{P} ;
- l'action de contact du fil tendu : $\vec{F}_{f \rightarrow S}$ (tension du fil).

Écrivons les conditions d'équilibre :

- $\vec{P} + \vec{F}_{f \rightarrow S} = \vec{0}$; (1)
- \vec{P} et $\vec{F}_{f \rightarrow S}$ sont portées par la verticale contenant le fil tendu.

Analysons les forces appliquées au fil f ; il est soumis (c) à :

- son poids, négligeable ;
- l'action de contact du solide : $\vec{F}_{S \rightarrow f}$;
- l'action de contact du dynamomètre D : $\vec{F}_{D \rightarrow f}$.

Les conditions d'équilibre s'écrivent :

- $\vec{F}_{S \rightarrow f} + \vec{F}_{D \rightarrow f} = \vec{0}$; (2)
- les deux forces sont portées par la même verticale.

Appliquons le Principe d'interaction :

- au point de contact A : $\vec{F}_{f \rightarrow S} = -\vec{F}_{S \rightarrow f}$; (3)
- au point de contact B : $\vec{F}_{D \rightarrow f} = -\vec{F}_{f \rightarrow D}$. (4)

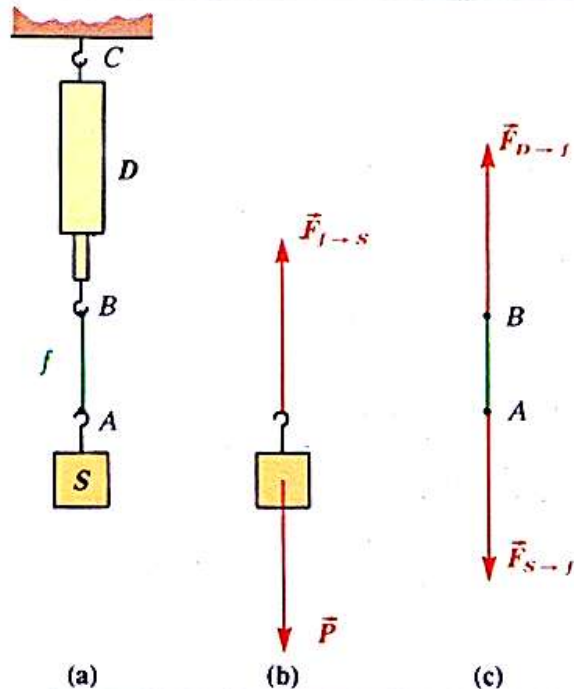
Combinons les relations (1), (2), (3) et (4) ; il vient :

$$\vec{P} = -\vec{F}_{f \rightarrow S} = \vec{F}_{S \rightarrow f} = -\vec{F}_{D \rightarrow f} = \vec{F}_{f \rightarrow D},$$

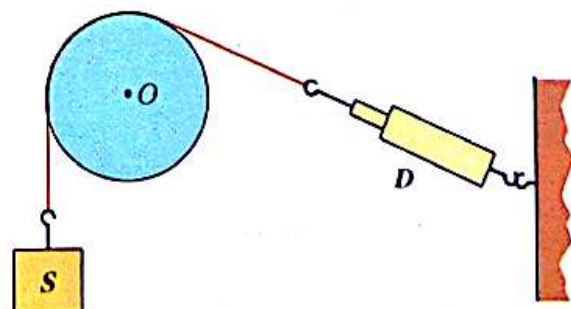
soit :

$$\vec{F}_{S \rightarrow f} = \vec{F}_{f \rightarrow D} = \vec{P}.$$

Un fil tendu transmet intégralement une force ; en mesurant la tension du fil, le dynamomètre mesure du même coup le poids du corps S . Nous avons admis cette propriété lors de l'étude expérimentale.



Remarque : On constate, ci-dessous, qu'avec une poulie bien huilée, le dynamomètre indique encore l'intensité du poids de l'objet. Le système {fil tendu, poulie} permet de modifier l'orientation d'une force sans en changer l'intensité.



POUR ALLER PLUS LOIN

Solide sur un plan incliné

Considérons une surface plane Π et posons sur celle-ci un solide S . Envisageons deux cas.

1. Les surfaces en contact sont parfaitement polies et lubrifiées : pas de frottement

Si la surface plane Π est horizontale, le solide est au repos. L'équilibre a pour conséquence que les actions de contact exercées par Π sur S , sont équivalentes à une force unique \vec{R} directement opposée à \vec{P} :

- $\vec{R} + \vec{P} = \vec{0}$;
- \vec{R} a un support passant par G , vertical, perpendiculaire à Π .

Conventionnellement, le point d'application de \vec{R} sera pris sur la surface de contact, en A (fig. 6a).

\vec{R} est appelé réaction du plan sur le solide.

Nous venons de voir (paragraphe 20.5) que, lorsqu'il n'y a pas de frottement et qu'il y ait mouvement ou non, \vec{R} reste perpendiculaire au plan.

Cela est confirmé si nous inclinons légèrement Π : S se met à glisser. \vec{R} restant perpendiculaire au plan, \vec{R} et \vec{P} ne se compensent plus : la variation de quantité de mouvement du solide n'est plus nulle, et ce dernier se met en mouvement (fig. 6b).

2. Les surfaces en contact sont rugueuses

Nous constatons que le solide reste en équilibre tant que l'angle d'inclinaison α du plan Π par rapport à l'horizontale est inférieur à une valeur limite α_0 .

— Pour $\alpha \leq \alpha_0$, le solide étant en équilibre (fig. 6c) :

- $\vec{R} + \vec{P} = \vec{0}$. (1)
- \vec{R} et \vec{P} ont un même support vertical.

La force \vec{R} , restant verticale, n'est plus perpendiculaire à Π (sauf si $\alpha = 0$) : on dit qu'il y a frottement.

Ce sont les forces de frottement exercées par le plan sur le solide qui s'opposent au glissement de celui-ci.

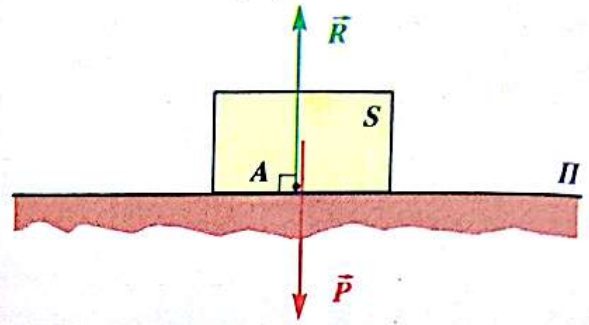
— Pour $\alpha > \alpha_0$, le solide glisse^(*). Les frottements se manifestent toujours, mais sont insuffisants pour empêcher le solide de glisser. La relation (1) n'est plus vérifiée. En effet \vec{R} ne peut s'incliner, par rapport à la perpendiculaire au plan Π , d'un angle supérieur à α_0 (fig. 6d). Ainsi \vec{P} et \vec{R} ne peuvent plus se compenser et la variation de quantité de mouvement du solide n'est plus nulle.

Cet angle α_0 , appelé angle limite d'adhérence, est caractéristique de la nature des matériaux en contact et de l'état des surfaces en contact. α_0 est d'autant plus grand que les surfaces sont rugueuses. Pour des surfaces lubrifiées : $\alpha_0 \approx 0$; on retrouve le cas précédent : dès qu'on incline le plan, il y a glissement.

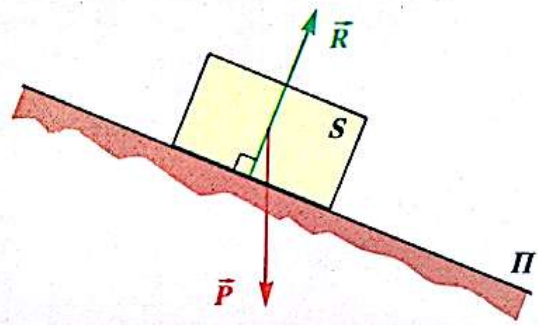
Les frottements sont indispensables à la vie quotidienne; sans eux, il nous serait impossible de marcher, de rouler en voiture, de monter à une échelle ou tout simplement de tenir un crayon!

(*) Si α est trop grand, le support de \vec{P} ne passe plus à l'intérieur de la zone de contact et le solide bascule.

pas de frottement
 \vec{R} reste perpendiculaire à Π

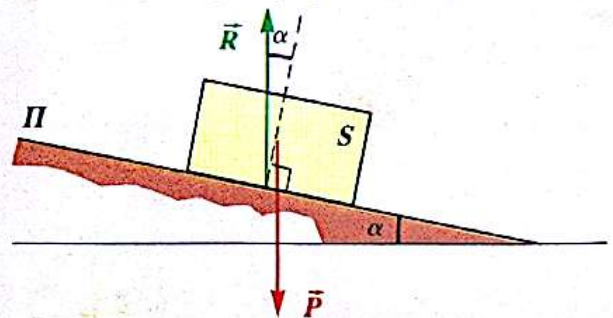


6a. Il y a équilibre ou mouvement rectiligne uniforme de G .

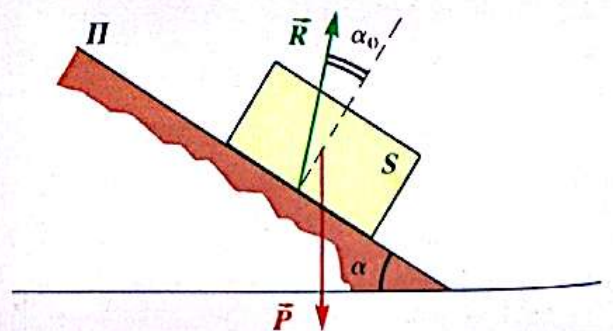


6b. Il y a mouvement avec \vec{v}_G non constant.

frottement :
 \vec{R} n'est plus perpendiculaire à Π



6c. Équilibre: $\alpha \leq \alpha_0$.



6d. Mouvement : $\alpha > \alpha_0$.

POUR ALLER PLUS LOIN

Équilibre d'un corps flottant

1. Poussée d'Archimède

Considérons un solide entièrement plongé dans un fluide en équilibre (liquide ou gaz) sous l'action de la pesanteur. Ce solide est soumis de la part du fluide qui l'entoure à des forces de contact réparties, forces de pression qui s'exercent sur toute sa surface. Le théorème d'Archimède précise l'action de ces forces (fig. 7) :

- Un solide plongé dans un fluide est soumis à des forces de pression équivalentes à une force concentrée, appliquée au centre de gravité A de la partie du fluide dont le solide occupe la place (A est aussi appelé « centre de poussée »), de direction verticale, dirigée vers le haut et égale au poids du volume du fluide ainsi déplacé.

Attention! le centre de poussée A est en général différent du centre de gravité du solide. C'est le cas d'un corps flottant (fig. 8) ou d'un corps non homogène.

2. Équilibre d'un corps flottant

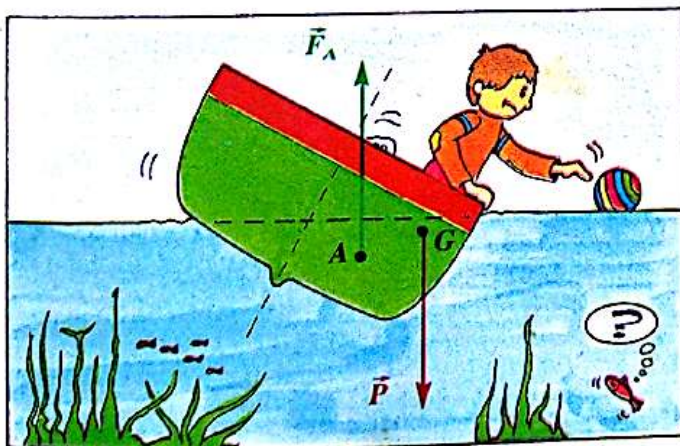
Lorsqu'un solide flotte sur un liquide (fig. 8), il se trouve en équilibre sous l'action des forces de pesanteur et des forces de pression des fluides qui l'entourent. Ces forces sont équivalentes :

- au poids (G, \vec{P});
- à la poussée d'Archimède (A, \vec{F}_A) due au liquide; on néglige celle due à l'air car le poids de l'air déplacé est négligeable devant celui du liquide déplacé.

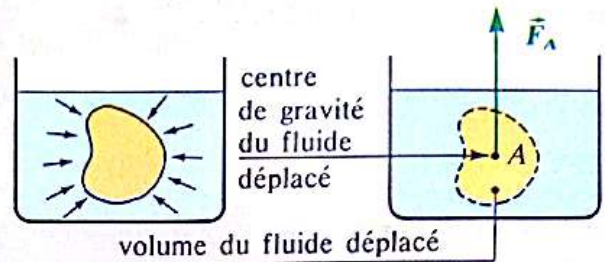
Puisqu'il y a équilibre, ces deux forces sont directement opposées :

- A et G sont sur la même verticale;
- $\vec{F}_A + \vec{P} = \vec{0}$.

Si nous écartons le corps flottant de sa position d'équilibre, celui-ci est soumis à un couple qui peut, selon le cas, le faire basculer ou osciller à la surface du liquide (fig. 9 et 10).

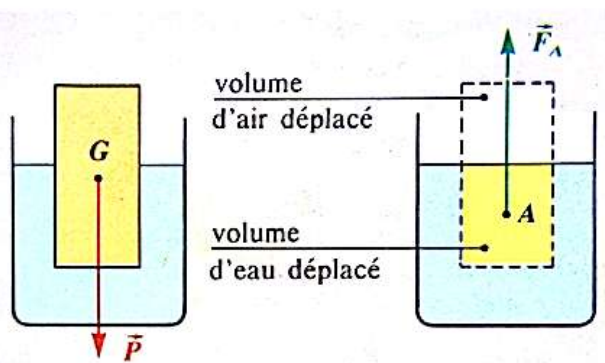


10. Le passager en se penchant déplace le centre de gravité du système {bateau + passager}; le bateau est alors soumis à un couple qui tend à le faire basculer. Il est dangereux de se pencher hors d'une barque...



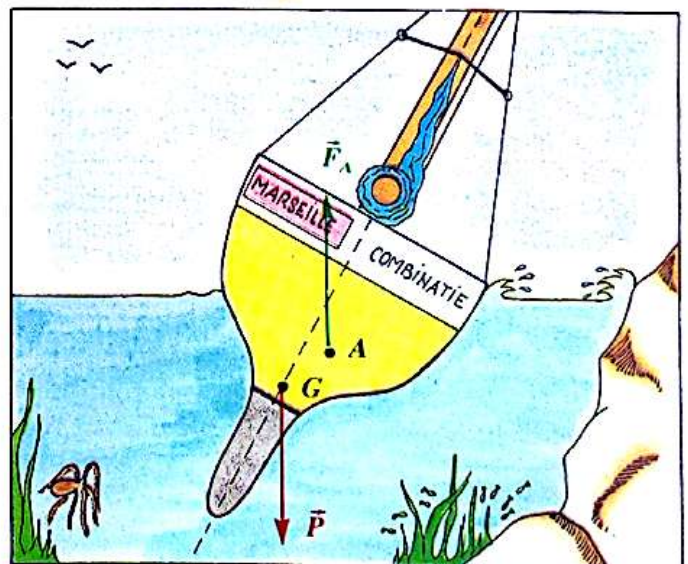
7. Si ρ_L est la masse volumique du liquide et V_d le volume du fluide déplacé, l'intensité de la poussée d'Archimède est :

$$F_A = \rho_L \cdot V_d \cdot g.$$



8. Le solide flotte : $\|\vec{F}_A\| = \|\vec{P}\|$. Si ρ_S est la masse volumique du solide et V_S son volume, on a donc :

$$\rho_L \cdot V_d \cdot g = \rho_S \cdot V_S \cdot g, \text{ soit } \rho_L \cdot V_d = \rho_S \cdot V_S.$$



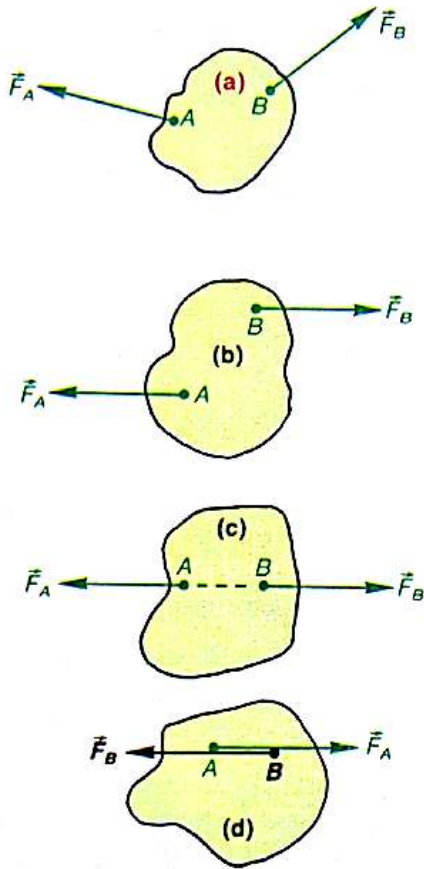
11. La quille du bateau est lestée avec un matériau lourd (plomb ou minerai d'uranium); la position du centre d'inertie du système {bateau + passagers} varie très peu en fonction de l'inclinaison. Le bateau, même avec une forte inclinaison, se redresse sous l'action du couple formé par le poids \vec{P} et la poussée d'Archimède \vec{F}_A .

Faire le point

- Rappeler les conditions nécessaires d'équilibre d'un solide soumis à deux forces.
- Quelle est la propriété d'une poulie?
- Définir un couple de forces.
- Quel est l'effet d'un couple de forces sur le mouvement d'un corps?

Analyse de quelques situations simples

20.1 La figure ci-dessous représente différents cas d'un solide soumis à deux forces de même intensité. Dans quels cas y-a-t-il équilibre? Lorsqu'il y a équilibre, préciser si l'équilibre est stable ou instable.

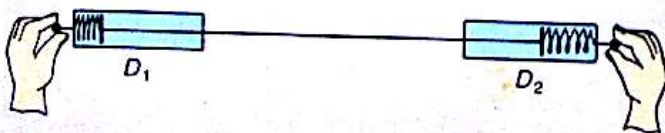


20.1

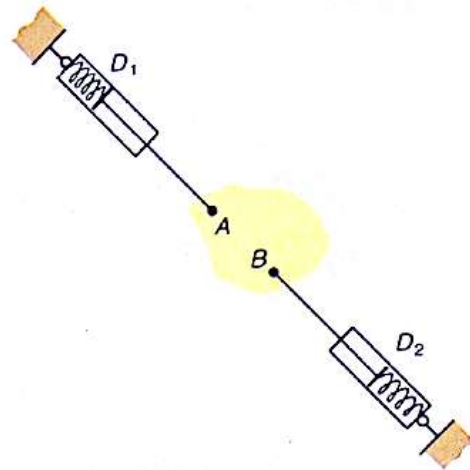
20.2 Au cours d'une expérience représentée ci-dessous, le dynamomètre D_1 indique 3 N, le dynamomètre D_2 , 6 N. Des deux affirmations suivantes, quelle est celle qui est exacte et pourquoi?

- 1/ La main gauche exerce une force de 3 N; la main droite une force de 6 N.
- 2/ Les dynamomètres (ou l'un d'eux) sont mal étalonnés : ils devraient indiquer la même intensité.

20.2

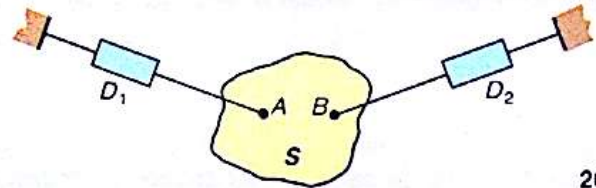


20.3 Un solide de masse négligeable est soumis à l'action de deux dynamomètres D_1 et D_2 . D_1 indique 5 N et D_2 6 N. Les fils sont dans le prolongement l'un de l'autre. Discuter sur l'équilibre ou le mouvement du solide.



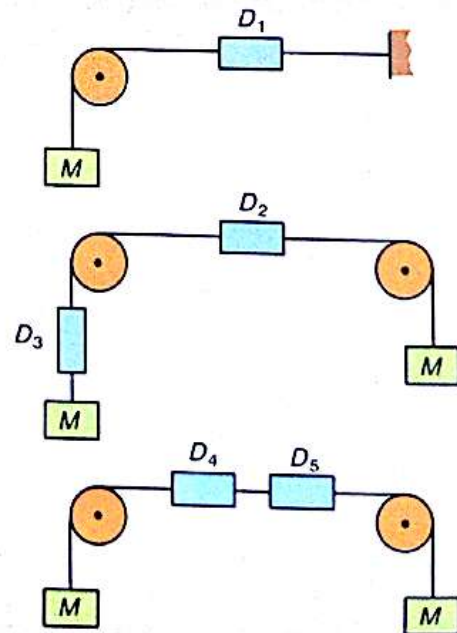
20.3

20.4 Le solide S est soumis à l'action de deux dynamomètres. Ceux-ci indiquent à l'équilibre la même intensité. D'après la figure, le poids de S est-il négligeable? Pourquoi?



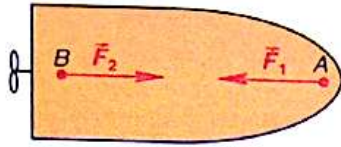
20.4

20.5 On considère les trois systèmes en équilibre schématisés sur la figure ci-dessous. Les dynamomètres ont un poids négligeable et les masses M sont toutes égales à 400 g. En prenant $g = 10 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$, quelles sont les indications données par ces dynamomètres?



20.5

20.6 Un navire à hélice avance à vitesse constante. L'action de l'eau sur le navire est équivalente à une force \vec{F}_1 appliquée en A. L'action de l'hélice est équivalente à une force de poussée \vec{F}_2 appliquée en B, telle que $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{0}$. Pouvez-vous expliquer pourquoi il faut faire usage constant de la barre, pour garder un cap constant?



20.6

1/ Déterminer les forces qui s'exercent sur chaque partie du système {fil + crochet + masse}.

2/ On décompose le système en deux sous-systèmes {corps + fil} et {crochet}. Déterminer les forces extérieures qui s'exercent sur chacun de ces deux sous-systèmes.

20.10 Un ressort de raideur k a l'une de ses extrémités fixée à un crochet C. Avec la main on tire sur l'autre extrémité afin de provoquer un allongement de 8 cm. Déterminer les forces s'exerçant sur le ressort et sur le crochet.

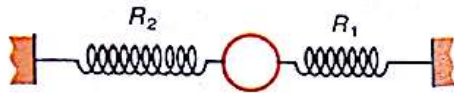
Donnée : $k = 50 \text{ N.m}^{-1}$.

20.11 Le système de la photographie ci-dessous est en équilibre.

1/ Étudier l'équilibre du morceau de liège. De quelle force le dynamomètre mesure-t-il l'intensité? Pourquoi peut-on dire que le poids du liège est négligeable? Quelle est l'intensité de la tension \vec{T} du fil?

2/ Étudier l'équilibre des masses marquées. En déduire l'intensité du poids \vec{P} de ces masses ($g = 10 \text{ N.kg}^{-1}$).

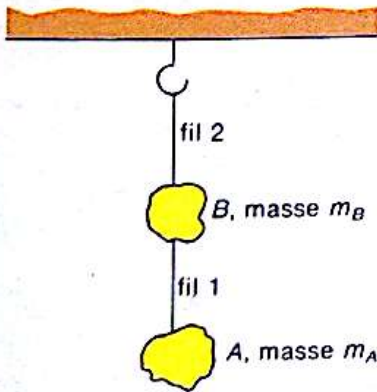
20.7 On dispose de deux ressorts R_1 et R_2 . Le ressort R_1 a une longueur de 10 cm et s'allonge de 1 cm pour une force appliquée de 1 N. Le ressort R_2 a une longueur de 15 cm et s'allonge de 3 cm pour une force appliquée de 1 N. On les réunit à un anneau de poids et de dimensions négligeables. Les deux autres extrémités du ressort sont fixées à deux crochets distants de 30 cm. Calculer la longueur de chaque ressort et les forces de tension des ressorts.



20.7

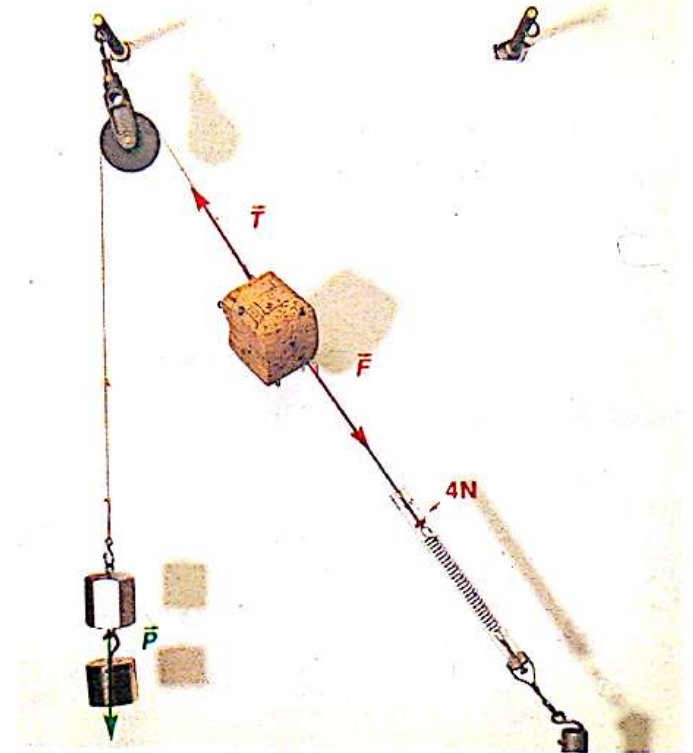
Solides suspendus

20.8 Soit le dispositif de la figure ci-dessous. Déterminer les forces extérieures qui s'exercent sur chaque partie du système. On néglige le poids des fils.

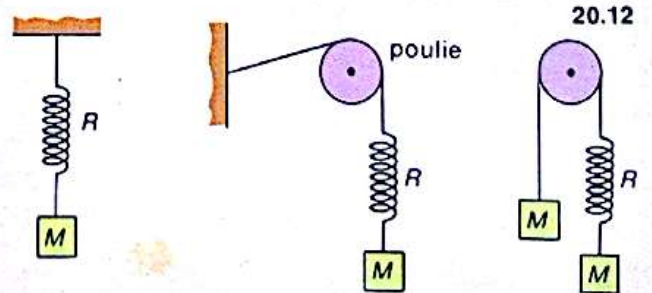


20.8

20.9 Un corps de masse m est suspendu, par un fil, à un crochet. Les poids du fil et du crochet sont négligeables devant celui de la masse m .

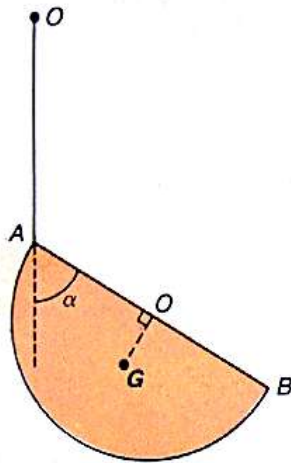


20.12 R est un ressort à spires non jointives. Montrer que dans les trois dispositifs représentés, l'allongement du ressort est identique.



20.12

20.13 Un demi-disque homogène de masse m est suspendu à l'aide d'un fil attaché en A . Le centre d'inertie du disque est tel que $OG = 0,42 R$, R étant le rayon du disque. Dessiner la position exacte de ce disque soumis au champ de pesanteur. A l'équilibre, quel angle α fait la direction AB avec la verticale?



20.13

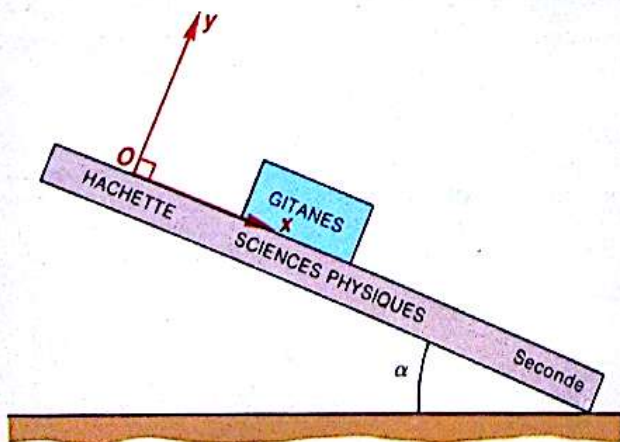
Solides sur un plan

20.14 Philippe pose sur la couverture de son livre de physique une boîte d'allumettes. Il soulève un bord du livre pour former un plan incliné. Pour $\alpha = \alpha_0 = 30^\circ$, la boîte se met à glisser.

1/ Déterminer à cet instant (à la limite du glissement) la réaction \vec{R} exercée par le livre sur la boîte. Masse de la boîte : 50 g; $g = 10 \text{ N.kg}^{-1}$.

2/ Pour $\alpha = \alpha_0$, déterminer dans le repère (O, x, y) les composantes de la réaction \vec{R} .

3/ Pour $\alpha = 40^\circ$, que se passe-t-il? Si on admet que la composante R_x de \vec{R} suivant Ox est la même que pour $\alpha = \alpha_0$ et que la somme des forces est dirigée selon Ox , calculer R_y .



20.14

20.15 Un palet de masse m est posé sur une table à coussin d'air inclinée d'un angle α par rapport à un plan horizontal. Il n'y a pas de frottement.

1/ Faire le bilan des forces s'exerçant sur le palet (faire un schéma).

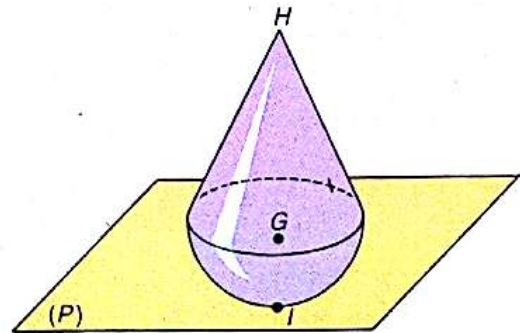
2/ Sachant que la somme \vec{F} des forces est parallèle à une ligne de plus grande pente de la table, reprendre votre schéma. Calculer $\|\vec{F}\|$ en fonction de m, g et α . Le palet peut-il être en équilibre?

Application numérique: $m = 0,65 \text{ kg}; g = 10 \text{ N.kg}^{-1}; \alpha = 10^\circ$.

20.16 Un jouet est constitué d'un hémisphère surmonté d'un cône; les dimensions sont telles que le centre d'inertie est en G , centre de l'hémisphère et de la base du cône. Ce jouet est posé sur un plan horizontal. On peut considérer que les forces de contact qu'exerce le plan sur le solide sont équivalentes à une force localisée en I , point de contact.

1/ Montrer que lorsque la direction HG est verticale, le corps est en équilibre.

2/ On écarte le sommet H de sa position initiale. Montrer, à l'aide de schémas, qu'il existe une infinité de positions d'équilibre. On dit que le jouet est en équilibre indifférent.

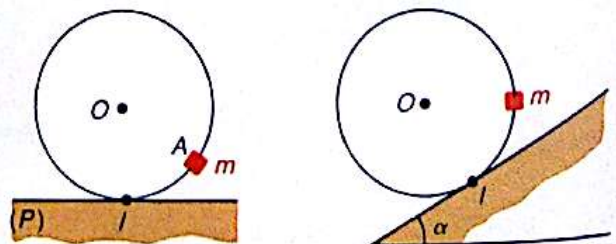


20.16

20.17 Un cerceau de masse m , de rayon a , est lesté par une masselotte considérée comme ponctuelle, de masse m et fixée sur la jante. Il est posé sur un plan P et reste en équilibre verticalement. Soit I le point de contact du cerceau avec le plan. Les actions de contact du sol sur le cerceau sont équivalentes à une force localisée au point I .

1/ Le cerceau est sur un plan horizontal P . Montrer qu'à l'équilibre, le centre d'inertie G du système {cerceau + masselotte} est sur la verticale passant par I et qu'il existe deux positions d'équilibre, l'une stable, l'autre instable.

2/ On incline le plan P d'un angle α faible. Le plan étant rugueux, le cerceau ne glisse pas. Montrer, à l'aide de schémas, qu'il existe deux positions d'équilibre du système {cerceau + masselotte}. Sur ces schémas les forces appliquées au système seront mises en évidence.

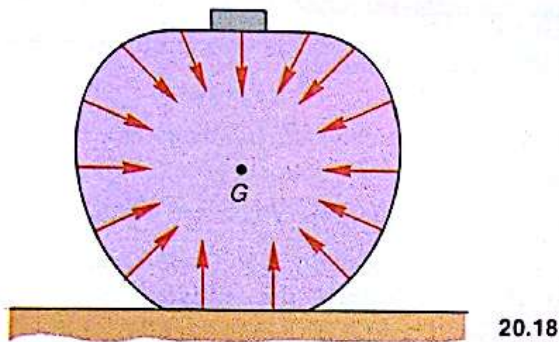


20.17

Systèmes soumis à des forces réparties

20.18 Considérons un récipient entièrement rempli d'un liquide de masse m et de centre d'inertie G . Le récipient exerce sur le liquide tout un ensemble de forces de contact, réparties sur le pourtour du liquide. Ces forces réparties maintiennent le liquide en équilibre dans la forme imposée par la forme du vase.

En supposant qu'à l'équilibre on puisse considérer le liquide comme un système indéformable, déterminer la force équivalente aux forces de contact réparties exercées par le vase. On déterminera la norme de cette force, son orientation; on précisera son support.



20.18

20.19 Un parachutiste descend verticalement à vitesse constante \vec{v} . La masse du système {parachute + parachutiste} est égale à 80 kg.

1/ Montrer que les forces réparties dues à l'action de l'air sont équivalentes à une force verticale.

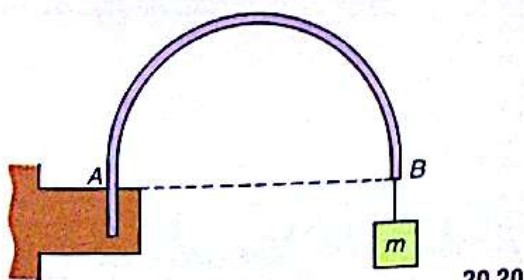
2/ La norme de la force résistante est de la forme $R = 58v^2$ avec v en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, R en N. Calculer la vitesse de descente du parachutiste. ($g = 9,81 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$.)

Un peu de réflexion

20.20 Un demi-cerceau, de poids négligeable, est fixé à l'une de ses extrémités dans un mur en A . A l'autre extrémité, on suspend une masse m . Le système est en équilibre.

1/ Représenter la force exercée par le fil tendu, lié en B au demi-cerceau.

2/ Peut-on admettre que l'action mécanique exercée par le mur en A sur le demi-cerceau peut être représentée par une seule force localisée en A ? Si non, pourquoi?



20.20

Pour aller plus loin Poussée d'Archimède

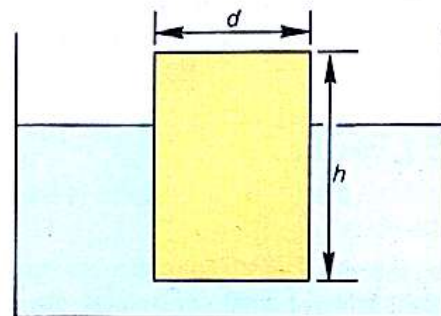
Rappel : Un solide, entièrement plongé dans un système de fluides en équilibre, est soumis à un système de forces de pression de la part de ce fluide. Ce système de forces de pression est équivalent à une force concentrée appelée poussée d'Archimède, verticale, dirigée de bas en haut, égale au poids des fluides déplacés et dont le support passe par le centre de gravité des fluides déplacés, appelé centre de poussée.

20.21 On plonge dans l'eau un cylindre de bois de diamètre d et de hauteur h .

1/ A l'équilibre, calculer la hauteur de la partie immergée. On néglige la poussée d'Archimède due à l'air.

2/ Déterminer la position du centre de poussée. En déduire que cet équilibre est instable et que le cylindre, soumis à un couple, peut basculer.

Données : $h = 20 \text{ cm}$; densité du bois : 0,65.



20.21

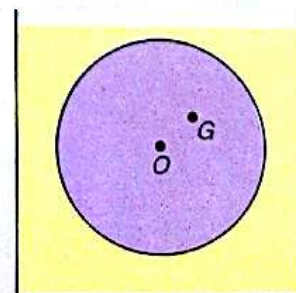
20.22 Une boule de densité 7,25, de volume V , flotte à la surface du mercure. Seul le volume V_1 émerge du mercure de densité 13,7. Calculer le rapport V_1/V .

20.23 Un iceberg de masse volumique $910 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a un volume émergé de 600 m^3 . L'eau salée de l'océan a une masse volumique de $1024 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Quel est le volume total et la masse de l'iceberg?

20.24 Un objet sphérique de rayon $a = 10 \text{ cm}$, inhomogène, flotte dans l'alcool de masse volumique $0,821 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$; il est entièrement immergé.

1/ Quelle est sa masse?

2/ Son centre d'inertie G est à $R/2$ du centre O de la sphère. Montrer que, selon la position de G , il est soumis à un couple. Montrer alors qu'il existe une position d'équilibre stable et une position d'équilibre instable.



20.24

21.

Équilibre d'un solide soumis à trois forces non parallèles

21.1 conditions d'équilibre

Nous disposons d'un solide S léger, découpé dans du liège par exemple. Nous le soumettons (*photo 1*) à trois forces localisées, exercées par des fils tendus : (A, \vec{F}_1) ; (B, \vec{F}_2) ; (C, \vec{F}_3) . Selon le dispositif utilisé, les intensités des forces sont lues sur un dynamomètre ou déterminées en calculant le poids des masses marquées servant à tendre les fils.

L'étude expérimentale ci-contre montre qu'à l'équilibre, les trois forces \vec{F}_1 , \vec{F}_2 et \vec{F}_3 , supposées non parallèles :

- sont coplanaires (elles sont situées dans un même plan, *photo 2*, vue latérale);
- ont des droites d'action concourantes (elles se coupent en un même point, *fig. 3*);
- ont une somme vectorielle nulle (ce qui implique qu'elles soient effectivement coplanaires, *fig. 4*).

- Lorsqu'un solide soumis à trois forces \vec{F}_1 , \vec{F}_2 et \vec{F}_3 est en équilibre, nécessairement :

1. La somme vectorielle des trois forces est nulle :

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = \vec{0}.$$

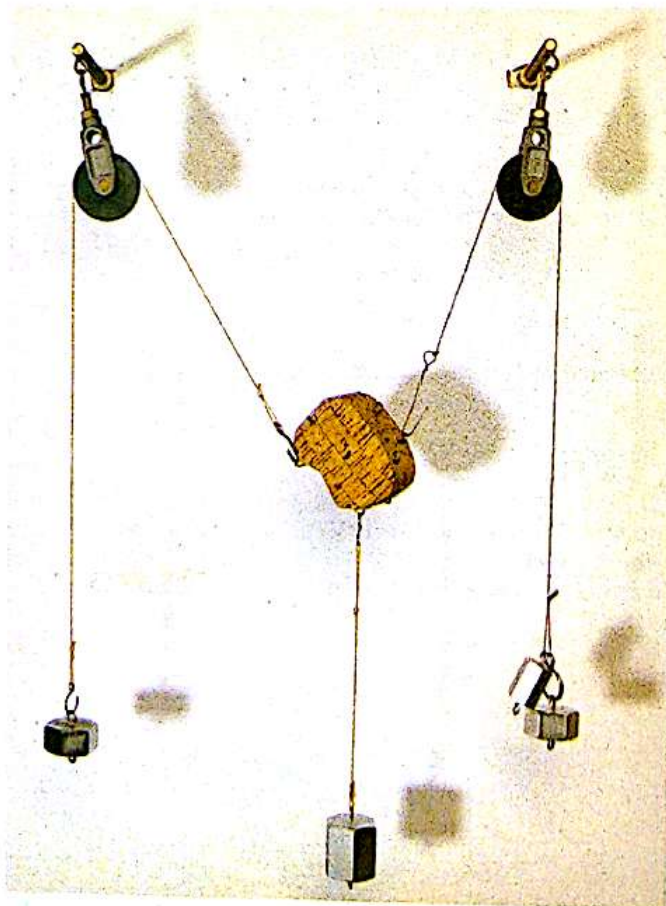
Cette première condition est nécessaire à l'immobilité du centre d'inertie G .

2. Les supports des trois forces sont concourants.

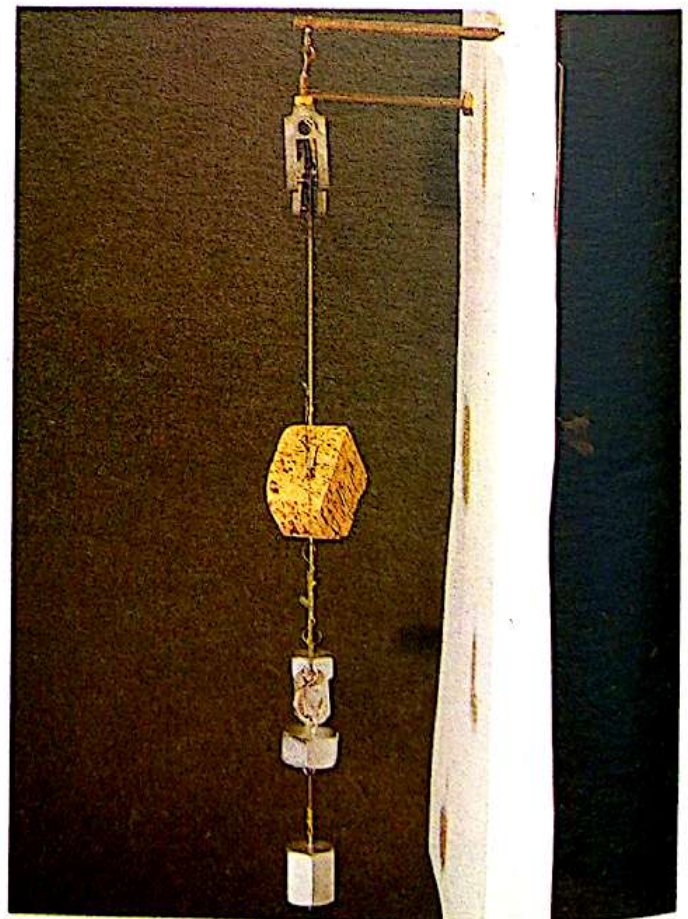
La première condition étant satisfaite, cette seconde condition est nécessaire à l'absence de rotation.

Si l'une des deux conditions n'est pas satisfaite, le solide n'est pas en équilibre.

Ces conditions sont nécessaires mais non suffisantes. En effet, lorsqu'elles sont réalisées, un solide peut avoir son centre d'inertie G animé d'un mouvement rectiligne uniforme ($\Delta\vec{p}$ est encore nul) et (ou) un mouvement propre de rotation autour de G .



1. Ce solide en liège est soumis à trois forces localisées.



2. A l'équilibre, les trois forces sont coplanaires.

La première condition pouvait être prévue : à l'équilibre la variation de quantité de mouvement du solide étant nulle ($\Delta \vec{p} = \vec{0}$), la somme des forces appliquées est nécessairement nulle.

Remarque : Possibilité d'un équilibre. Considérons le triangle formé par les trois forces lorsqu'on réalise leur somme vectorielle. Nous avons vu en mathématique le théorème suivant :

Dans un triangle, la longueur d'un côté est inférieure ou égale à la somme des longueurs des deux autres côtés et supérieure ou égale à la valeur absolue de leur différence.

Dans notre cas, pour F_3 par exemple :
 $F_1 - F_2 \leq F_3 \leq F_1 + F_2$

L'étude expérimentale confirme ce théorème; en cas d'équilibre :

$$0,5 \text{ N} \leq F_3 \leq 2,5 \text{ N}$$

(L'équilibre ci-dessous a été réalisé avec $F_3 = 2 \text{ N}$.)

Fiche expérimentale

équilibre d'un solide soumis à trois forces

La photo 1 représente un solide S soumis à l'action de trois fils tendus. Les intensités F_1, F_2, F_3 des forces $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3$ exercées sur S par les fils tendus sont respectivement égales aux intensités des poids $\vec{P}_1, \vec{P}_2, \vec{P}_3$ des masses m_1, m_2, m_3 suspendues (une poulie ne change que la direction d'une force, cf. application 3 du chapitre 20).

Le solide est choisi très léger, de telle sorte que son poids soit négligeable devant les autres forces appliquées. De ce fait S peut être considéré comme seulement soumis à \vec{F}_1, \vec{F}_2 et \vec{F}_3 .

Nous nous proposons de réaliser un équilibre et de déterminer les conditions auxquelles satisfont les trois forces appliquées.

- Nous vérifions que l'équilibre de S n'est pas toujours possible pour des masses m_1, m_2 et m_3 quelconques. L'équilibre réalisé, et reproduit ci-contre, est obtenu pour :

$$m_1 = 0,1 \text{ kg}, \quad m_2 = 0,15 \text{ kg}, \quad m_3 = 0,2 \text{ kg},$$

soit en prenant $g = 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$:

$$F_1 = 1 \text{ N}, \quad F_2 = 1,5 \text{ N} \quad \text{et} \quad F_3 = 2 \text{ N}.$$

- Déplaçons légèrement le solide S : il revient toujours dans la même position.

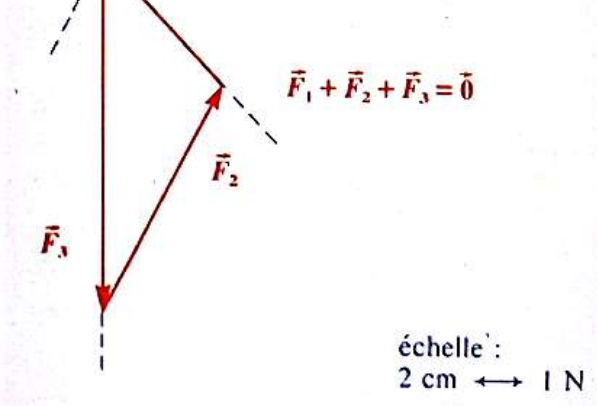
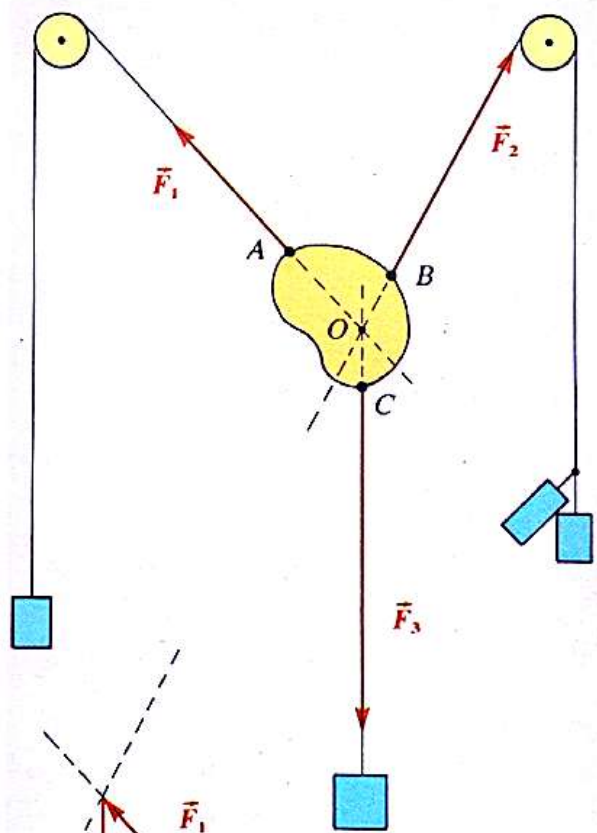
- Observons de profil le dispositif expérimental (photo 2). Tous les fils sont dans un même plan : les supports des trois forces sont *coplanaires*.

- Repérons (par leur ombre) les supports des brins de fil issus de A, B et C , points où s'exercent respectivement les forces (A, \vec{F}_1), (B, \vec{F}_2) et (C, \vec{F}_3) sur S . Nous constatons que ces supports se coupent en un même point O : ils sont *concourants*.

- Représentons à l'échelle $2 \text{ cm} \leftrightarrow 1 \text{ N}$ (fig. 3) les forces \vec{F}_1, \vec{F}_2 et \vec{F}_3 exercées à l'équilibre par les fils tendus sur S . A partir d'un point quelconque de la feuille, traçons la somme vectorielle des trois forces.

Aux erreurs de tracé près, nous constatons que cette somme est nulle :

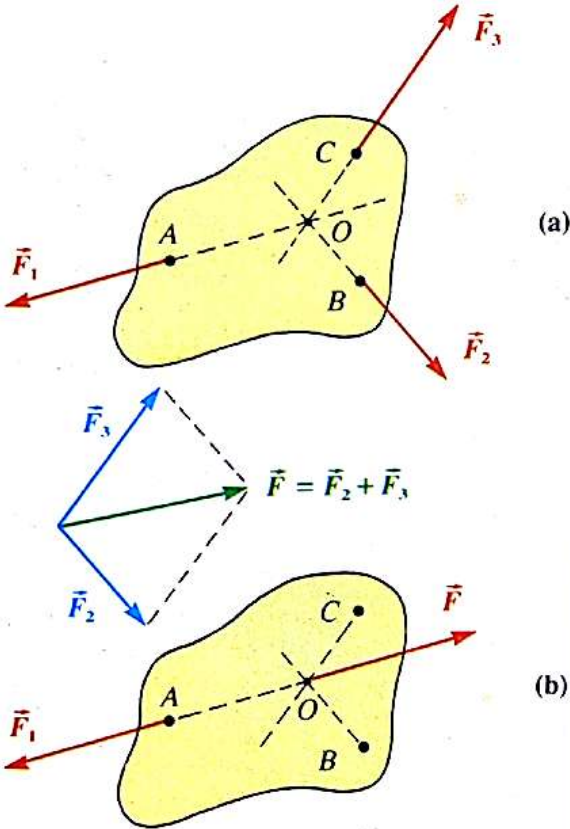
$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = \vec{0}.$$



3. A l'équilibre, aux erreurs d'expérience près, la somme vectorielle est nulle.

Application 1 : Loi de composition des forces

On considère un solide de poids négligeable devant les forces localisées (A, \vec{F}_1) , (B, \vec{F}_2) , (C, \vec{F}_3) qui lui sont appliquées. Ce solide est en équilibre. Montrer que l'on peut remplacer les forces (B, \vec{F}_2) et (C, \vec{F}_3) par une force unique appliquée en O , intersection des supports des deux forces.



4. Si l'on remplace deux ou trois forces par leur somme vectorielle, appliquée en O , l'équilibre n'est pas rompu.

Le solide est en équilibre. Le support de \vec{F}_1 passe donc nécessairement par O (fig. 4a); par ailleurs nous avons : $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = \vec{0}$.

Supposons que \vec{F}_2 et \vec{F}_3 soient remplacées par une force \vec{F} telle que $\vec{F} = \vec{F}_2 + \vec{F}_3$ et s'appliquant en O (fig. 4b). Nous pouvons alors écrire :

$$\vec{F} + \vec{F}_1 = \vec{0}.$$

Ces forces sont opposées et leurs supports colinéaires. Le solide est donc soumis à deux forces directement opposées : il reste en équilibre.

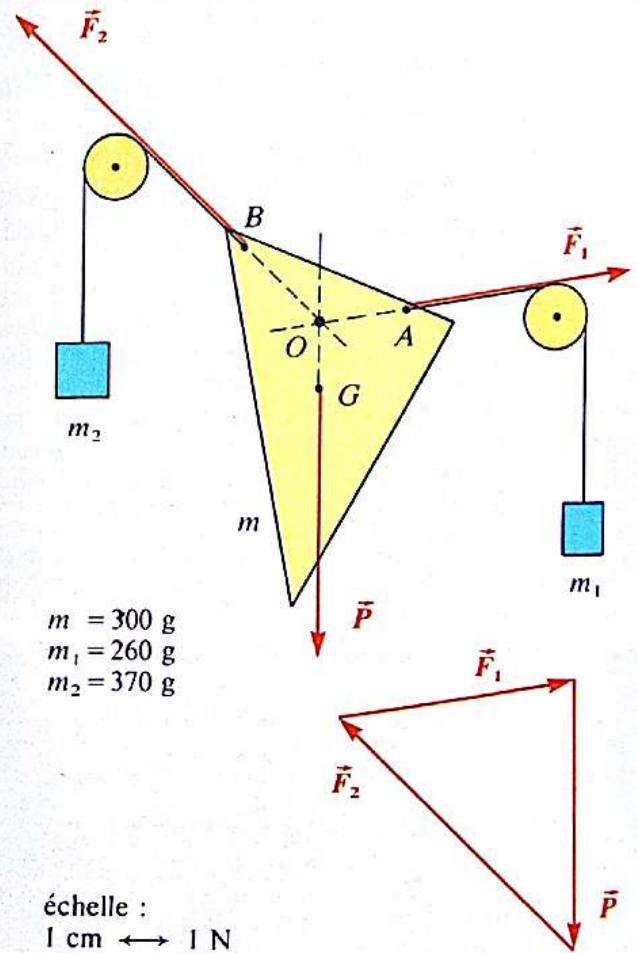
Nous pouvons alors énoncer une loi de composition des forces : *On ne change pas l'équilibre d'un solide si deux forces localisées, dont les supports se coupent en un point O , sont remplacées par une force unique, appliquée en O , et égale à la somme vectorielle de ces deux forces.*

Réciproquement, une force dont le support passe par un point O peut être remplacée par deux forces dont les supports se coupent en O et dont la somme vectorielle est égale à la force remplacée.

21.2 lorsque le poids intervient...

Nous disposons maintenant d'un solide plat S , de poids assez important, dont on a repéré au préalable le centre de gravité G . Deux fils tendus maintiennent S en équilibre, comme l'indique la figure 5.

Si le poids de S était négligeable devant les forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 , celles-ci auraient, à l'équilibre, une somme nulle et les brins des fils partant de A et de B seraient sur une même droite; or ce n'est pas le cas.



5. Le poids n'est pas négligeable devant \vec{F}_1 et \vec{F}_2 .
A l'équilibre : $\vec{P} + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{0}$.

Le poids n'étant pas négligeable le solide est soumis à 3 forces extérieures :

- son poids \vec{P} ;
- les tensions \vec{F}_1 et \vec{F}_2 exercées par les fils.

Nous constatons que les supports de \vec{F}_1 et de \vec{F}_2 ainsi que la verticale passant par G sont coplanaires et concourants.

Cette étude confirme une fois encore que le poids, somme des forces de pesanteur réparties en volume, est assimilable à une force unique \vec{P} dont la droite d'action passe par le centre de gravité G du solide.

Nous vérifions aussi qu'à l'équilibre :

$$\vec{P} + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{0}.$$

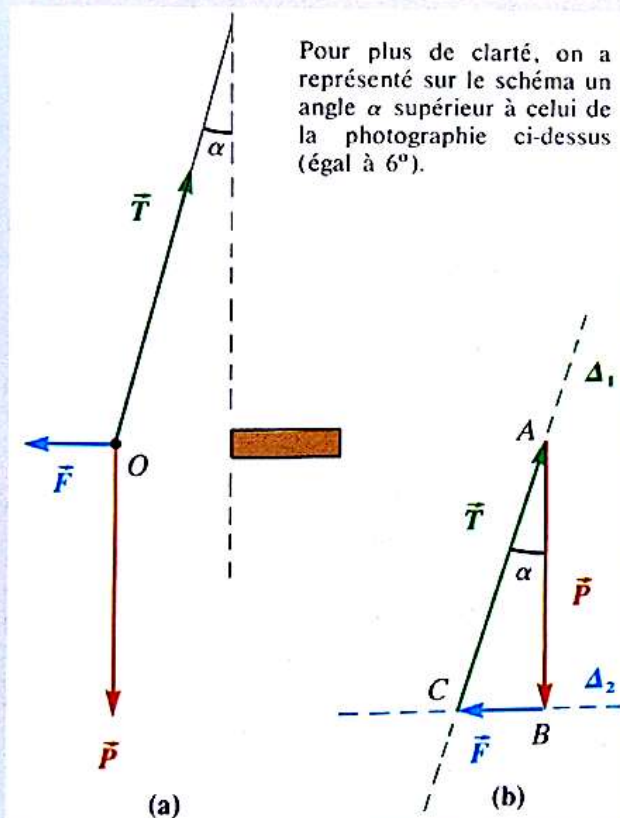
Application 2 : Détermination d'une force d'origine électrostatique

La boule chargée d'un pendule électrostatique, de poids $P=0,03\text{ N}$, est repoussée par un corps chargé. A l'équilibre, le fil du pendule fait un angle $\alpha=6^\circ$ avec la verticale. On suppose que la force d'origine électrique s'exerçant sur la boule a une direction horizontale. Déterminer la force d'origine électrique exercée sur la boule et la tension du fil.

Précisons le système étudié : la boule du pendule, assimilable à un élément matériel confondu avec le centre O de la boule.

Faisons le bilan des forces extérieures appliquées à la boule (fig. 6a) :

- la tension \vec{T} du fil, force exercée par le fil sur la boule, et dont le support à la direction du fil;
- le poids \vec{P} de la boule, force exercée par la Terre sur la boule, et dont la direction est verticale et l'intensité connue ($0,03\text{ N}$);
- la force électrique \vec{F} , force exercée par le corps chargé sur la boule chargée, et dont la direction est horizontale.



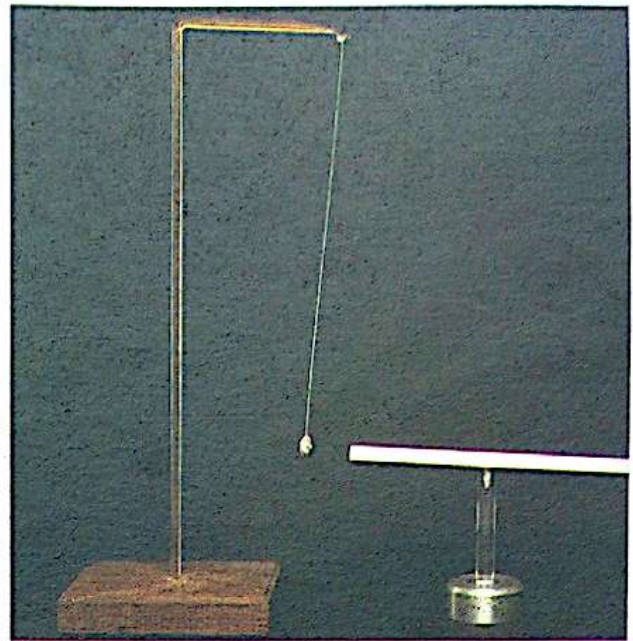
6. A l'équilibre, le fil du pendule électrostatique fait un angle α avec la verticale et l'on a :

$$\vec{P} + \vec{F} + \vec{T} = \vec{0}.$$

La boule étant en équilibre, appliquons les conditions nécessaires à l'équilibre :

- Les trois forces sont concourantes au point O ;
- leur somme vectorielle est nulle :

$$\vec{T} + \vec{P} + \vec{F} = \vec{0}.$$



De ce fait, ces forces sont coplanaires, situées dans le plan vertical contenant le fil tendu.

D'un point A quelconque du plan (fig. 6b) traçons un vecteur \vec{AB} représentant \vec{P} . (Échelle : $3\text{ cm} \leftrightarrow 0,03\text{ N}$.)

De A , traçons une droite figurant le support de \vec{T} ; la direction de cette droite Δ_1 fait un angle α avec \vec{AB} . De B , traçons une droite représentant le support de \vec{F} ; cette droite Δ_2 est perpendiculaire au support de \vec{AB} (en effet \vec{P} est vertical, \vec{F} horizontale).

Les droites Δ_1 et Δ_2 se coupent au point C . Le vecteur \vec{BC} représente \vec{F} , le vecteur \vec{CA} représente \vec{T} ; en effet :

$$\vec{AB} + \vec{BC} + \vec{CA} = \vec{0}.$$

Nous pouvons maintenant déterminer les normes de \vec{F} et de \vec{T} .

- Graphiquement : Avec un schéma réalisé à l'échelle (ce n'est pas le cas de la figure 6 où la valeur de α n'a pu être respectée pour plus de clarté), il suffit de mesurer les segments BC et CA pour déterminer $F = \|\vec{F}\|$ et $T = \|\vec{T}\|$.

Il faut cependant noter que la faible valeur de F rend ici cette détermination graphique imprécise.

- Par le calcul, en considérant le triangle rectangle ABC :

$$\tan \alpha = \frac{BC}{AB} = \frac{F}{P}; \quad F = P \cdot \tan \alpha;$$

$$\text{soit} \quad F = 0,0300 \times \tan 6^\circ = 0,0032\text{ N}.$$

La force électrique a une très faible intensité. De même

$$\cos \alpha = \frac{AB}{CA} = \frac{P}{T}; \quad T = \frac{P}{\cos \alpha};$$

$$\text{soit} \quad T = \frac{0,0300}{\cos 6^\circ} = 0,0302\text{ N}.$$

Application 3 :

Une hallebarde est exposée comme le montre la figure ci-contre. On admettra que l'attache de la chaîne en B est ponctuelle ainsi que la région d'appui en C.

Le centre d'inertie G de cette arme, de masse 20 kg, est à 1,30 m de l'extrémité C du manche. La longueur du manche CB est 1,80 m. La chaîne horizontale AB a une longueur de 80 cm et un poids négligeable.

A l'équilibre, déterminer la réaction \vec{R} qui s'exerce en C sur le manche et la tension \vec{T} de la chaîne. On prendra $g = 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$.

La hallebarde est soumise à trois forces :

- son poids \vec{P} , appliqué en G ;
- la réaction \vec{R} exercée par le mur en C, et dont il faut déterminer l'orientation ;
- la tension \vec{T} exercée par la chaîne tendue, au point B. La tension \vec{T} est dirigée suivant AB. En effet, la chaîne est soumise en B à la force $-\vec{T}$ (Principe d'interaction) et en A, du fait de son attache au mur, à une force \vec{R}' .

Comme on néglige le poids de la chaîne, l'équilibre de celle-ci implique que :

- $\vec{R}' + (-\vec{T}) = \vec{0}$;
- \vec{R}' et \vec{T} sont directement opposées; leur droite d'action est AB(*).

A l'équilibre, ces trois forces sont nécessairement concourantes et coplanaires.

Soit I le point de concours des supports de \vec{T} et de \vec{P} . Le support de \vec{R} passe par I.

Calculons l'angle $\alpha = (\widehat{CI, CA})$ que fait \vec{R} avec le mur vertical. Dans le triangle rectangle IAC nous avons :

$$\tan \alpha = \frac{AI}{AC}.$$

Calculons AI. Les parallèles AC et IG, verticales, découpent les segments BA et BC de telle sorte que (théorème de Thalès) :

$$\frac{AI}{CG} = \frac{AB}{CB} \implies AI = CG \cdot \frac{AB}{CB}.$$

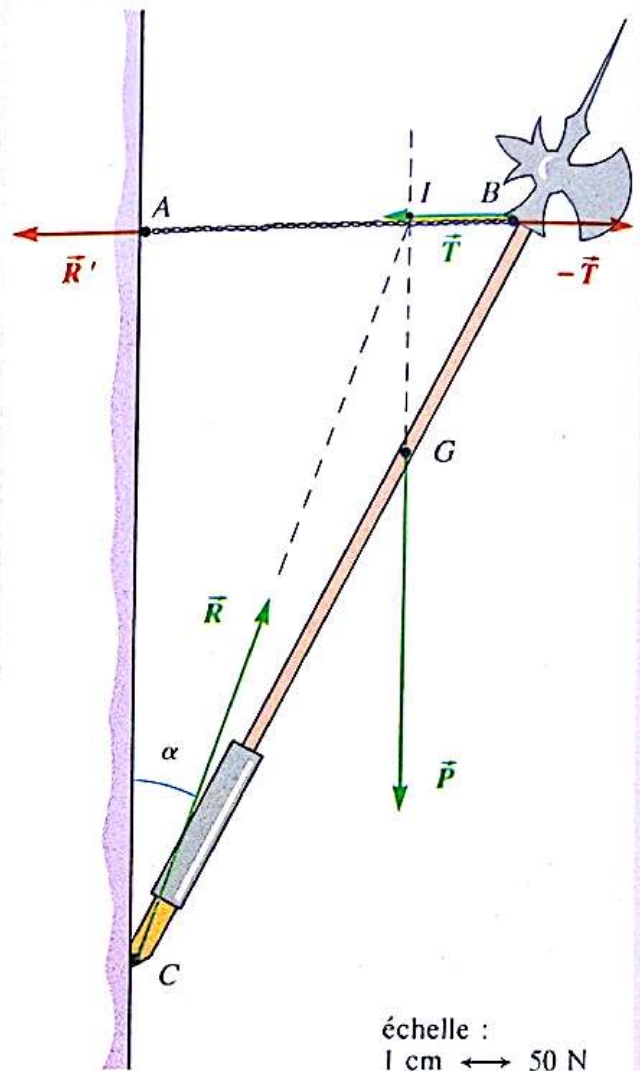
Calculons AC. Dans le triangle rectangle ABC (théorème de Pythagore) :

$$AC^2 = BC^2 - AB^2.$$

Il vient :

$$\tan \alpha = \frac{CG \cdot AB}{CB \cdot \sqrt{BC^2 - AB^2}}.$$

(*) Notons bien que cette propriété n'est plus vraie si l'on prend en compte le poids de la chaîne. Dans le cas d'un fil, dont le poids est négligeable, la tension a toujours une droite d'action confondue avec le fil.



Numériquement, avec $CG = 1,30 \text{ m}$, $AB = 0,80 \text{ m}$, $CB = 1,80 \text{ m}$:

$$\tan \alpha = 0,36 \quad \text{et} \quad \alpha \approx 20^\circ.$$

Notons que \vec{R} n'est pas perpendiculaire au mur, ce qui suppose des frottements. En l'absence de frottement (\vec{R} perpendiculaire en C au mur), l'équilibre indiqué serait impossible. C'est le frottement (mur rugueux) qui permet de maintenir la hallebarde dans la position indiquée en l'empêchant de glisser.

A l'équilibre de la hallebarde, la somme vectorielle des trois forces extérieures appliquées est nulle, soit :

$$\vec{P} + \vec{R} + \vec{T} = \vec{0}.$$

Par construction, nous obtenons un triangle rectangle $A'B'C'$ dont \vec{R} est l'hypoténuse et qui comporte l'angle α .

Nous avons, avec $P = m \cdot g \approx 200 \text{ N}$:

$$\cos \alpha = \frac{P}{R} \implies R = \frac{P}{\cos \alpha} = 213 \text{ N};$$

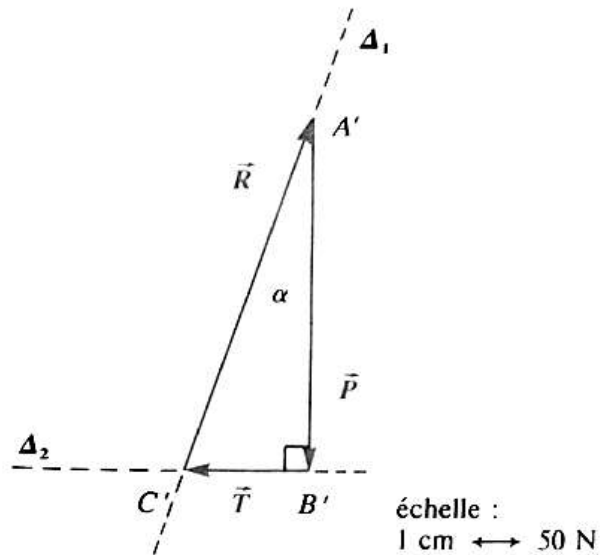
$$\tan \alpha = \frac{T}{P} \implies T = P \cdot \tan \alpha = 72 \text{ N}.$$

On peut également trouver R et T graphiquement. Pour cela, on trace d'abord $\vec{A'B'}$, vecteur vertical représentant \vec{P} . Puis on trace, de A' , la droite Δ_1 support de \vec{R} , qui fait un angle $\alpha = 20^\circ$ avec la verticale, et, de B' , la droite Δ_2 support de \vec{T} et perpendiculaire à $A'B'$. C' étant l'intersection de Δ_1 et Δ_2 , $\vec{B'C'}$ représente \vec{T} et $\vec{C'A'}$ représente \vec{R} .

A l'échelle 1 cm \leftrightarrow 50 N, $A'B' = 4$ cm, et l'on mesure :

$$C'B' = 1,45 \text{ cm} \leftrightarrow \|\vec{T}\| \approx 72,5 \text{ N},$$

$$A'C' = 4,3 \text{ cm} \leftrightarrow \|\vec{R}\| \approx 215 \text{ N}.$$



21.3 conclusion

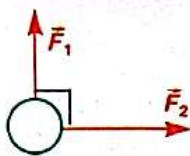
Pour étudier, relativement à un référentiel terrestre, l'équilibre d'un solide soumis à trois forces non parallèles, nous suivons la méthode ci-dessous.

1. Faire un schéma clair.
2. Définir le solide étudié; en effet le solide peut n'être qu'une partie du dispositif.
3. Faire l'analyse des actions extérieures agissant sur le solide.
4. Appliquer les conditions nécessaires d'équilibre :
 - Les supports des trois forces sont concourants. Cette condition permet en général de déterminer le point de concours des supports à l'aide de deux forces seulement; on pourra connaître ainsi la direction de la troisième force.
 - $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = \vec{0}$.
 Connaissant leur direction, on représentera les vecteurs forces à l'échelle. Une construction graphique permettra en général de résoudre le problème. On utilisera également des relations trigonométriques dans un triangle rectangle si cela est possible. On peut également définir un repère orthonormé et projeter la relation vectorielle suivant deux axes orthogonaux. On déterminera ainsi suivant ces deux axes les composantes des vecteurs \vec{F}_1 , \vec{F}_2 , \vec{F}_3 .
5. Appliquer le Principe d'interaction; si un support exerce sur un solide une force \vec{F} en un point M , le solide exerce en M sur le support une force \vec{F}' directement opposée à \vec{F} .

Faire le point

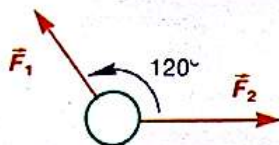
- Quelle est la condition nécessaire de non-déplacement du centre d'inertie (ou centre de gravité) G d'un solide soumis à trois forces?
- Quelle est la condition nécessaire de non-rotation pour un solide soumis à trois forces non parallèles?
- Quelles sont les conditions nécessaires d'équilibre d'un solide dans un référentiel terrestre lorsqu'il est soumis à trois forces non parallèles?

21.1 On tire sur un anneau à l'aide de trois cordes; les forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 exercées ont des intensités respectivement égales à 200 N et 300 N. Déterminer la direction et l'intensité de la force \vec{F}_3 qu'il faut exercer pour que l'anneau reste immobile.



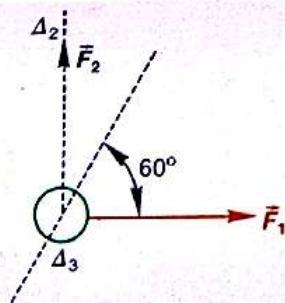
21.1

21.2 On maintient un anneau de masse négligeable, immobile, en exerçant trois forces à l'aide de trois cordes. Deux d'entre-elles font un angle de 120° et leurs intensités respectives sont $F_1 = 2500$ N et $F_2 = 3300$ N. Préciser l'intensité, la direction et le sens de la force \vec{F}_3 . (Faire une étude graphique.)



21.2

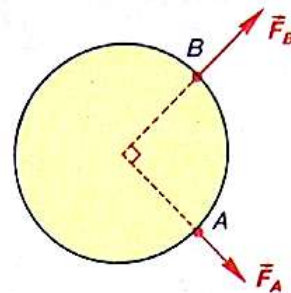
21.3 Un anneau de masse négligeable est soumis à l'action de trois forces; il est alors immobile. La force \vec{F}_1 a une intensité de 600 N. On connaît le support Δ_2 (orthogonal au support de \vec{F}_1) et le sens de \vec{F}_2 . Le support de \vec{F}_3 , Δ_3 , fait un angle de 60° avec la direction de \vec{F}_1 . Déterminer graphiquement et par le calcul les caractéristiques des forces \vec{F}_2 et \vec{F}_3 .



21.3

21.4 Montrer que si un corps est en équilibre sous l'action de trois forces coplanaires faisant entre elles des angles de 120° , les intensités de ces trois forces sont nécessairement égales.

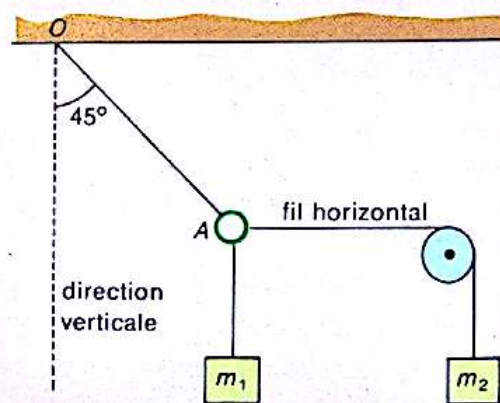
21.5 Sur une table à coussin d'air horizontale, un palet est soumis à l'action de trois dynamomètres situés dans un même plan horizontal et exerçant les forces \vec{F}_A , \vec{F}_B et \vec{F}_C . On donne $F_A = 10$ N et $F_B = 25$ N. Déterminer graphiquement la direction et l'intensité de la force \vec{F}_C afin que le palet soit immobile.



21.5

21.6 Les masses des fils et de l'anneau ci-dessous sont négligeables. A l'équilibre, le fil OA fait un angle de 45° avec la verticale. Calculer la masse m_2 pour réaliser cet équilibre. Calculer également la tension du fil OA . Cet équilibre dépend-il de la valeur de g ?

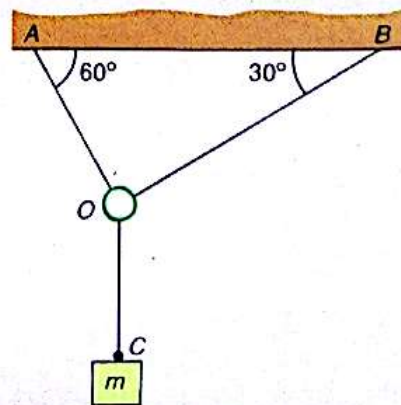
Données : poids de m_1 : 4 N; $g = 10$ N.kg⁻¹.



21.6

21.7 On considère le dispositif ci-après où OA , OB , OC sont des fils inextensibles et de masses négligeables. Le poids de la masse m est égal à 10 N.

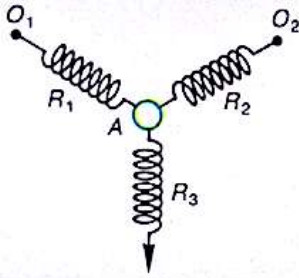
- 1/ Déterminer graphiquement les tensions des fils.
- 2/ Calculer les tensions des fils.



21.7

21.8 Les ressorts R_1 , R_2 , R_3 et l'anneau A ont une masse négligeable; R_1 et R_2 ont une longueur de 10 cm et s'allongent de 1 cm pour 1 N; R_3 a une longueur de 15 cm et s'allonge de 3 cm pour 1 N. Les trois ressorts sont attachés à un même anneau A ; les autres extrémités de R_1 et R_2 sont attachées en O_1 et O_2 distants de 20 cm. On tire sur l'extrémité libre de R_3 de façon que les angles des trois ressorts soient égaux à 120° .

- 1/ Quelles sont les longueurs des ressorts R_1 et R_2 à l'équilibre?
- 2/ Quelles sont leurs forces de tension?
- 3/ Quelle est la tension de R_3 ?
- 4/ En quel point faut-il fixer l'extrémité libre de R_3 pour que l'équilibre de A soit réalisé?



21.8

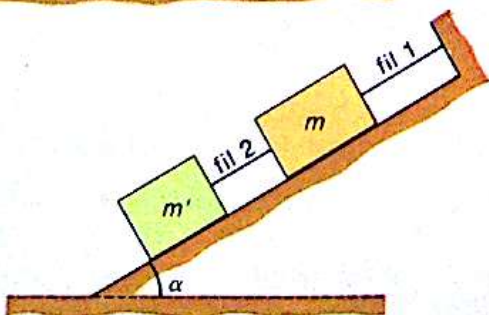
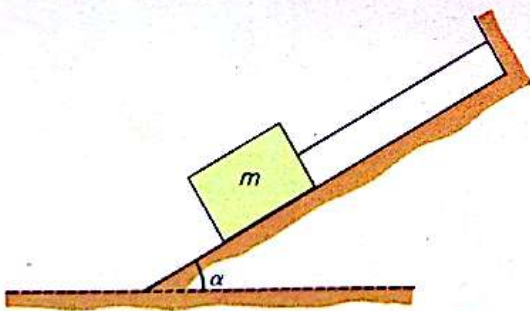
Solide sur un plan incliné

21.9 Un solide de masse $m = 2$ kg peut glisser sans frottement le long de la plus grande pente d'un plan incliné faisant un angle $\alpha = 30^\circ$ avec l'horizontale. Ce solide est retenu par un fil de masse négligeable, parallèle au plan comme l'indique la figure ci-après.

1/ Déterminer :

- a/ la tension du fil;
- b/ la réaction du plan.

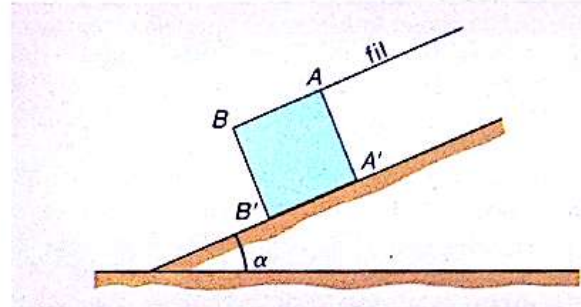
2/ A ce solide est accroché par un fil 2, et dans les mêmes conditions qu'à la 1^{re} question, un deuxième solide, de masse $m' = 1$ kg, comme l'indique la figure. Déterminer la tension de chacun des deux fils.



21.9

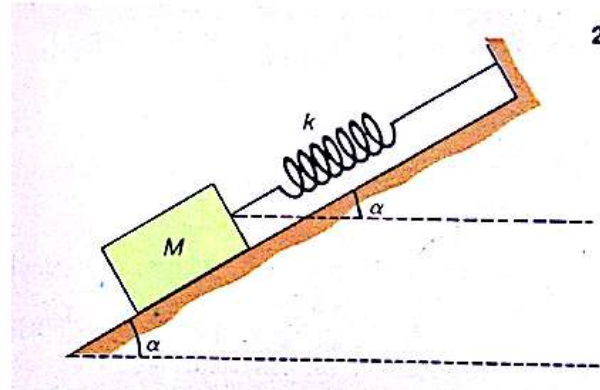
21.10 Un cube est posé sur un plan sans frottement, incliné d'un angle α par rapport à l'horizontale. On peut fixer au solide, soit en A , soit en A' , un fil maintenu parallèle à la ligne de plus grande pente du plan. Montrer que l'équilibre n'est possible que si α est inférieur à un angle α_m que l'on précisera. Que se passe-t-il pour $\alpha > \alpha_m$:

- 1/ Si le fil est fixé en A ?
- 2/ Si le fil est fixé en A' ?



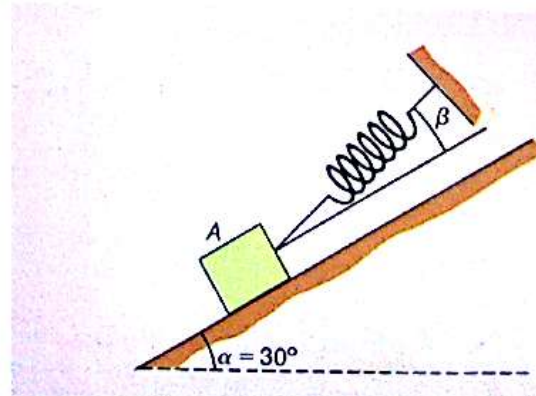
21.10

21.11 Un corps M , de masse $m = 10$ kg, est posé sur un plan incliné faisant un angle α avec l'horizontale. Ce corps est retenu, comme l'indique la figure ci-après, par un ressort de raideur $k = 1000 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$. Tracer le graphique de la fonction qui associe l'allongement du ressort au sinus de l'angle α . On prendra $g = 9,8 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$, et on ne tiendra pas compte des frottements. En déduire l'allongement pour $\alpha = 30^\circ$, puis $\alpha = 60^\circ$. Si l'allongement est de 7 cm, que vaut α ?



21.11

21.12 Un corps A de poids 3 N repose sans frottement sur un plan incliné d'un angle $\alpha = 30^\circ$ avec l'horizontale. La réaction du plan sur le corps A est perpendiculaire au plan. Ce corps est maintenu sur le plan incliné par l'intermédiaire d'un ressort faisant un angle β avec la ligne de plus grande pente du plan.

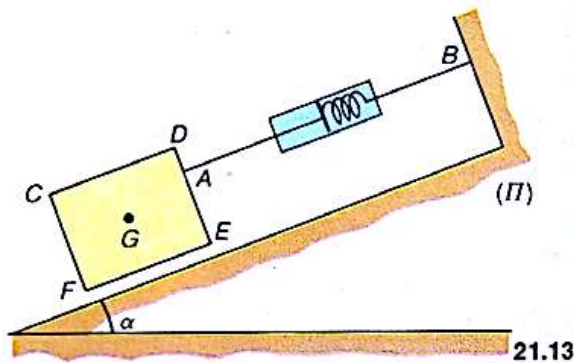


21.12

- 1/ Faire le bilan des forces qui s'exercent sur le corps A.
- 2/ En déduire l'intensité de la force \vec{F} exercée par le ressort sur A en fonction de l'angle β .
- 3/ Calculer $\|\vec{F}\|$ pour $\beta = 0^\circ$, $\beta = 30^\circ$, $\beta = 60^\circ$.
- 4/ En déduire dans chaque cas précédent l'allongement de ce ressort de raideur $k = 50 \text{ N.m}^{-1}$.

21.13 Un palet sur coussin d'air, de poids 7,4 N, est posé sur un plan incliné faisant un angle α avec l'horizontale. Il est maintenu immobile à l'aide d'un dynamomètre, l'ensemble AB étant parallèle au plan incliné. On a alors $AE = 6 \text{ cm}$, $DE = FE = 8 \text{ cm}$ et $\alpha = 18^\circ$. La réaction, répartie en surface, de l'air pulsé sur la « semelle » du palet, est équivalente à une force concentrée, somme des forces réparties, localisée en un point I de la semelle et perpendiculaire au plan incliné.

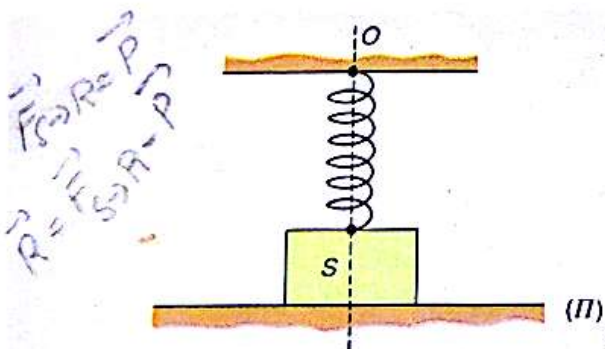
- 1/ Quelle est l'indication du dynamomètre?
- 2/ Calculer la réaction du plan incliné sur le palet et déterminer la position du point I.



21.13

Autres dispositifs

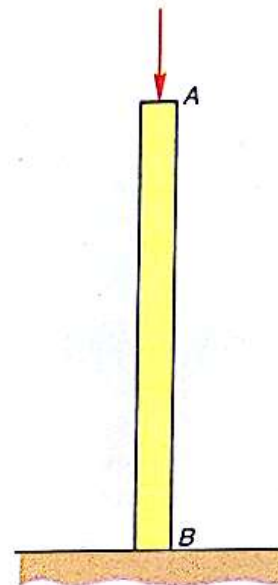
21.14 Un ressort de longueur $\ell_0 = 20 \text{ cm}$, de raideur $k = 100 \text{ N.m}^{-1}$, de masse négligeable, peut travailler en extension ou en compression. On y suspend un solide S de poids 10 N.



21.14

- 1/ Déterminer l'action exercée par le solide S sur le ressort.
- 2/ Le solide S repose sur un plan horizontal II, l'allongement du ressort n'est plus que de 5 cm. Déterminer l'action du solide S sur le plan II.
- 3/ On rapproche encore le plan II de façon à comprimer le ressort. La longueur du ressort à l'équilibre est égale à 10 cm. Déterminer l'action du solide S sur le plan II.

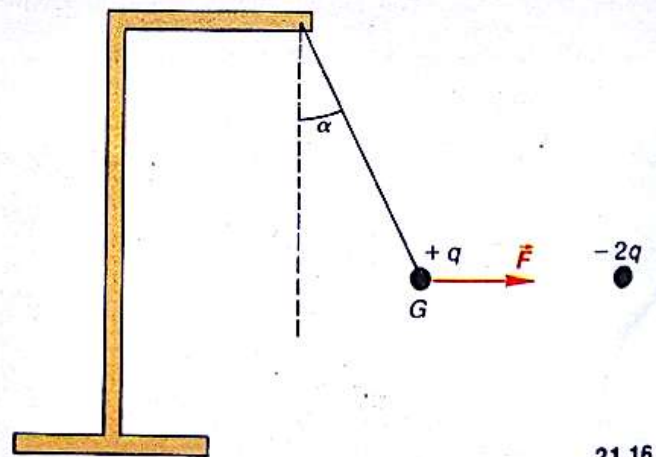
21.15 Une poutre de dimension transversale négligeable par rapport à sa longueur est disposée verticalement. Sa masse m est égale à 80 kg. On exerce à l'extrémité A une poussée verticale de 1000 N, dirigée de haut en bas; $g = 10 \text{ N.kg}^{-1}$. Calculer la réaction \vec{R} en B. Cette position est-elle stable?



21.15

21.16 La boule d'un pendule électrostatique de poids 0,02 N, portant une charge $+q$, est attirée par une charge électrique $-2q$. Les forces électriques exercées sur la boule sont équivalentes à une force horizontale, de droite d'action passant par G (centre d'inertie de la boule) et de norme 0,01 N.

- 1/ Déterminer l'angle α que fait le fil avec la verticale.
- 2/ Déterminer la force électrique exercée par la charge $+q$ sur la charge $-2q$ et la tension \vec{T} du fil.



21.16

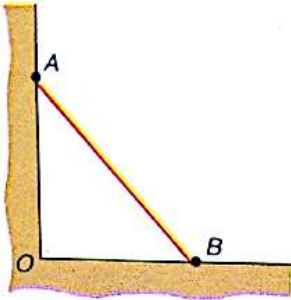
21.17 Une poutre homogène de masse m est posée contre un mur vertical; le sol est rugueux et horizontal; le mur est lisse. L'action du mur sur la poutre est une force localisée \vec{R}_A , perpendiculaire en A au mur vertical; celle du sol est une force \vec{R}_B localisée en B.

- 1/ Faire l'inventaire des forces extérieures appliquées à la poutre.
- 2/ Énoncer les conditions nécessaires à l'équilibre.

3/ Déterminer graphiquement la direction de l'action du sol \vec{R}_B sur la poutre. Quel est l'angle que fait cette direction avec la verticale?

4/ Calculer alors R_A et R_B .

Données : $OA = 4$ m ; $OB = 3$ m ; $m = 80$ kg ; $g = 10$ N.kg⁻¹.



21.17

21.18 Une barre AB de poids négligeable est disposée horizontalement contre un mur. En A est fixé un petit anneau de masse négligeable. A cet anneau sont accrochés un corps de masse M et un filin OA .

1/ Indiquer la direction des forces s'exerçant sur la barre.

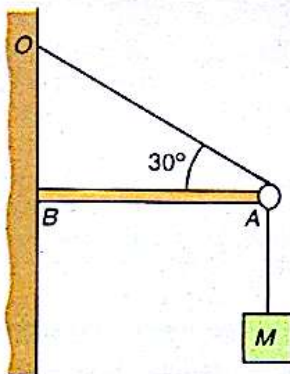
2/ Indiquer la direction des forces s'exerçant sur l'anneau.

3/ En déduire :

a/ la tension du filin,

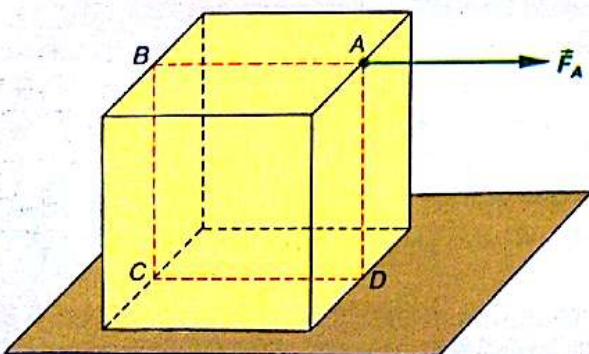
b/ la force exercée en B par le mur sur la barre.

Données : $M = 15$ kg ; $g = 10$ N.kg⁻¹.



21.18

21.19 Un container de forme cubique, d'arête égale à 1 mètre, est posé sur un plan horizontal. Le centre de gravité est au centre de symétrie du cube. Son poids est de 3000 N.



21.19

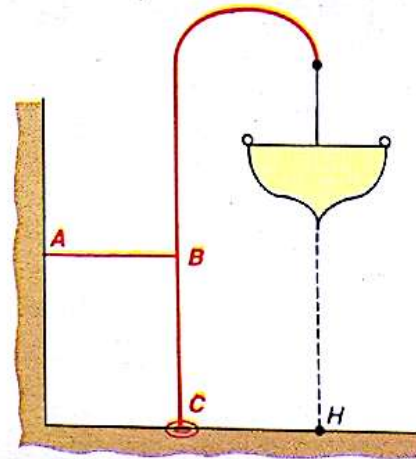
1/ Calculer la réaction \vec{R} du sol sur le cube lorsqu'il est soumis aux seules forces de pesanteur.

2/ On exerce alors une force horizontale \vec{F}_A contenue dans le plan vertical $ABCD$ de symétrie du cube par l'intermédiaire d'un filin attaché en A . Le cube commence à glisser sur le sol lorsque l'intensité de la force est égale à 600 N. Déterminer alors les caractéristiques de la réaction \vec{R} du plan.

21.20 Sur un navire, l'embarcation de sauvetage est suspendue à un porte-bateau. Celui-ci peut pivoter en C , perpendiculairement au plancher du pont du navire. Son poids est négligeable. Il est retenu par un câble AB horizontal. Le poids de l'embarcation de sauvetage est de 3000 N. On donne $BC = 2$ m, $CH = 1,6$ m.

1/ L'action de la liaison en C , exercée sur le porte-bateau, est équivalente à une force concentrée \vec{R} appliquée en C . En considérant l'équilibre du système {porte-bateau+embarcation de sauvetage}, déduire la direction de \vec{R} .

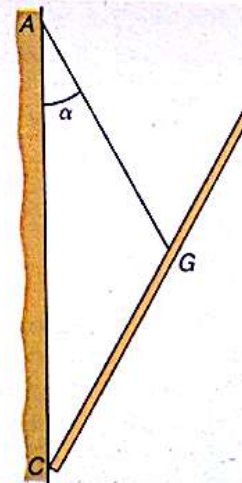
2/ Calculer alors $\|\vec{R}\|$ et la tension du câble AB .



21.20

21.21 Un tableau accroché à un mur repose en C contre un mur vertical. La suspension est telle que la direction du fil AG passe par le centre de gravité G du tableau et que la distance AG est égale à la distance CG . Déterminer la tension, c'est-à-dire la force exercée par le fil en G , et la force avec laquelle le tableau appuie sur le mur.

Données : poids du tableau : 30 N ; $\alpha = 30^\circ$.

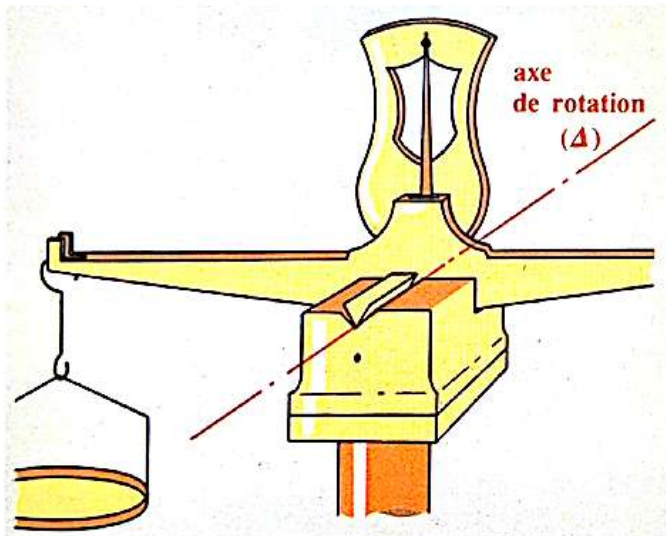


21.21

Moment d'une force par rapport à un axe

22.1 rotation d'un solide autour d'un axe

Une porte peut tourner autour de ses gonds : la droite verticale centrée sur ceux-ci constitue l'*axe de rotation* de la porte. Dans une balance ancienne, l'arête horizontale du couteau est l'axe de rotation du fléau.



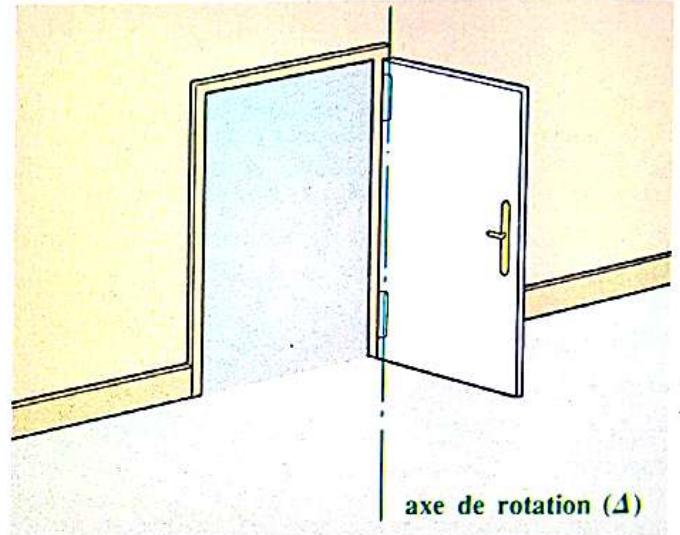
Dans ce qui suit, nous nous intéresserons à la rotation d'un solide autour d'un axe fixe (par rapport à la Terre).

Retournons une bicyclette et, à la main, tentons de faire tourner la roue avant, les freins étant légèrement serrés. Une force de faible intensité s'exerçant *loin* de l'axe peut obtenir le même effet qu'une force de plus grande intensité mais s'exerçant *près* de l'axe.

L'effet d'une force sur la rotation d'un solide ne dépend pas uniquement de la direction et de l'intensité de cette force.

Confirmons cette simple constatation par une étude expérimentale.

Remarque : Freins desserrés, provoquons la rotation de la roue avant de la bicyclette retournée : elle effectue plusieurs tours en ralentissant et finit par s'arrêter. Même si l'axe de rotation est monté avec un bon roulement à billes, bien huilé, des forces de frottement s'opposent toujours plus ou moins à la rotation. Cela est vrai quel que soit le dispositif, et il faut tenir compte de cet impondérable dans l'interprétation des résultats expérimentaux.



22.2 moment d'une force par rapport à un axe

22.2.1 constatations expérimentales

Sur un disque pouvant tourner avec peu de frottement autour d'un axe Δ horizontal (voir fiche expérimentale ci-contre), nous exerçons différentes forces : \vec{F}_0 , \vec{F}_1 , \vec{F}_2 ou \vec{F}_3 . Les supports de ces forces sont parallèles au disque, donc perpendiculaires à l'axe de rotation : ces forces sont dites orthogonales à l'axe.

Plus généralement, une force est orthogonale à un axe si son support appartient à un plan perpendiculaire à cet axe.

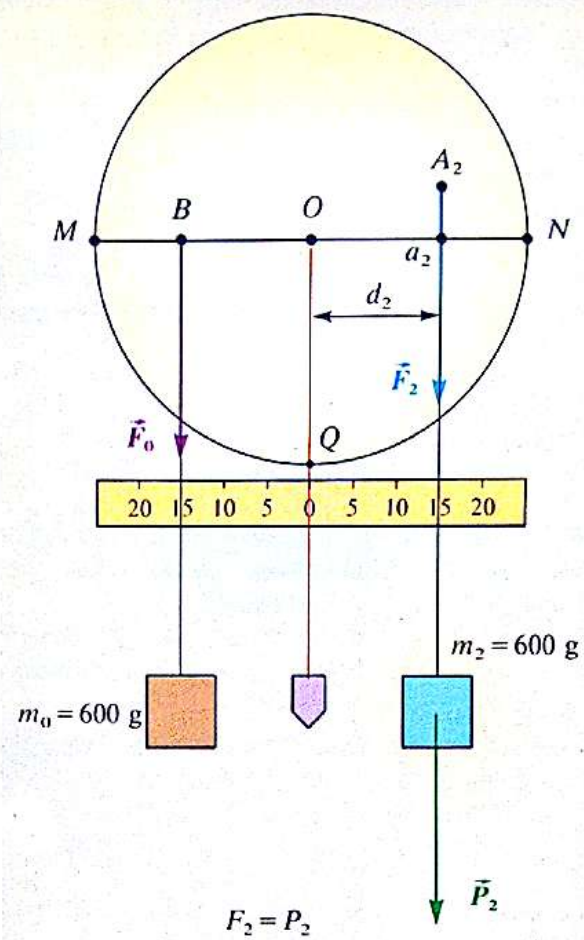
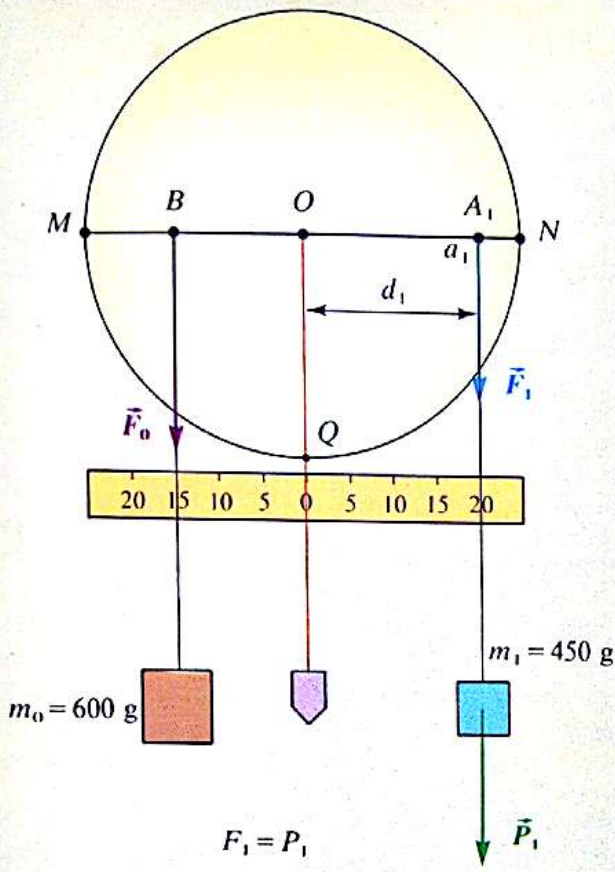
L'étude expérimentale ci-contre montre que pour obtenir un effet donné, la force à exercer est d'autant moins intense que la distance d de son support à l'axe est grande.

Pour obtenir le même effet :

$$F_1 \cdot d_1 = F_2 \cdot d_2 = F_3 \cdot d_3.$$

Cela montre l'importance de la distance d de l'axe Δ au support de la force appliquée : cette distance est appelée *bras de levier*.

Fiche expérimentale



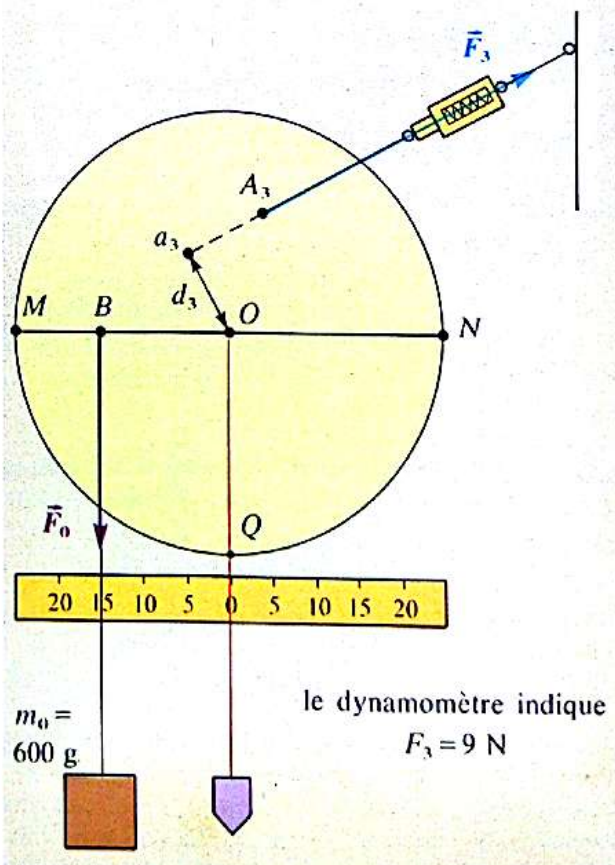
Nous disposons d'un disque mobile sans frottement appréciable autour d'un axe fixe horizontal Δ passant par son centre de gravité. Nous nous proposons de maintenir le rayon MN horizontal en exerçant au même point B la même force \vec{F}_0 et, successivement en différents points A_1, A_2, A_3 , des forces $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3$. Ces forces sont égales aux poids des masses suspendues aux fils. L'intensité de \vec{F}_3 est donnée par un dynamomètre.

Pour chaque équilibre, relevons l'intensité de la force et la longueur d du bras de levier (segment Oa perpendiculaire au support du fil tendu). Nous prendrons $g \approx 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$. Pour maintenir MN horizontal, nous avons obtenu, avec $OB = 0,15 \text{ m}$ et $F_0 = 6 \text{ N}$:

$F \text{ (N)}$	$F_1 = 4,5$	$F_2 = 6$	$F_3 = 9$
$d = Oa \text{ (m)}$	$d_1 = 0,2$	$d_2 = 0,15$	$d_3 = 0,1$

Nous constatons que :

- lorsque d diminue l'intensité de la force augmente (nous devons suspendre des masses plus importantes);
- le produit $F \cdot d$ est constant :
 $F_1 \cdot d_1 = F_2 \cdot d_2 = F_3 \cdot d_3 = 0,9 \text{ N} \cdot \text{m}$.



22.2.2 définition du moment

Les résultats précédents nous suggèrent la définition d'une nouvelle grandeur physique appelée **moment d'une force** par rapport à un axe de rotation. Cette grandeur caractérise l'effet d'une force sur un solide capable de tourner autour d'un axe. Agissant sur ce solide, deux forces ayant le même moment par rapport à l'axe auront le même effet.

Par définition :

- L'intensité du moment par rapport à un axe Δ d'une force \vec{F} orthogonale à cet axe est le produit de l'intensité F de cette force par la longueur d du bras de levier :

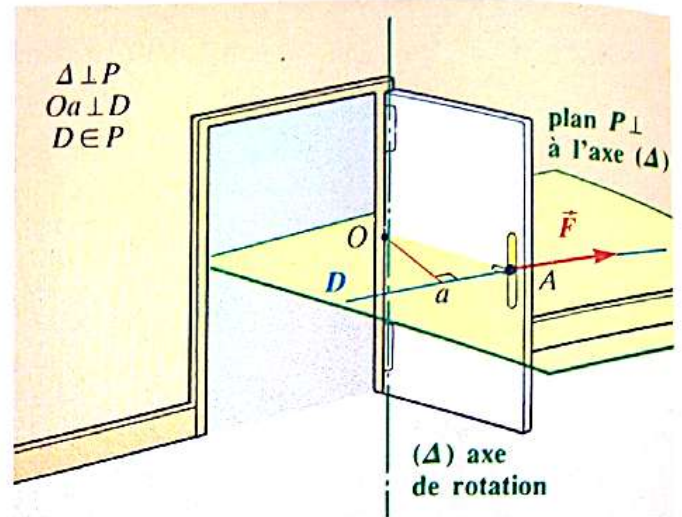
$$\mathcal{M}_{\Delta}(\vec{F}) = F \cdot d$$

N.m	N	m

La notation $\mathcal{M}_{\Delta}(\vec{F})$ se lit : « moment de la force \vec{F} par rapport à l'axe Δ ». Il faut toujours préciser l'axe par rapport auquel on mesure le moment.

Dans le système international d'unités (SI), F se mesure en newtons, d en mètres et le moment en newtons-mètres (symbole : N.m).

Notons bien que cette définition n'est valable que pour des forces orthogonales à l'axe de rotation.



1. Le point O est l'intersection de l'axe (Δ) avec le plan P qui lui est perpendiculaire. La force \vec{F} , orthogonale à l'axe (Δ) , est située dans le plan P . Le bras de levier Oa est perpendiculaire à la droite D support de la force \vec{F} . On a :

$$\mathcal{M}_{\Delta}(\vec{F}) = F \cdot Oa = F \cdot d.$$

Application 1 :

On reprend l'expérience de la fiche expérimentale. En B est toujours suspendue une masse de 600 g. On applique en A_3 une force \vec{F} , perpendiculaire à l'axe de rotation, d'intensité 7 N (indication du dynamomètre) dans le but de maintenir le disque dans la même position d'équilibre que celle de la fiche expérimentale (MN horizontal).

- 1/ Quel doit être le bras de levier de la force \vec{F} ?
- 2/ Déterminer sur un schéma la direction du fil tendu lié en A_3 au disque et l'orientation de la force \vec{F} .

1/ L'équilibre étant le même, la force \vec{F} a le même effet que les forces \vec{F}_1 , \vec{F}_2 ou \vec{F}_3 de la fiche expérimentale, et :

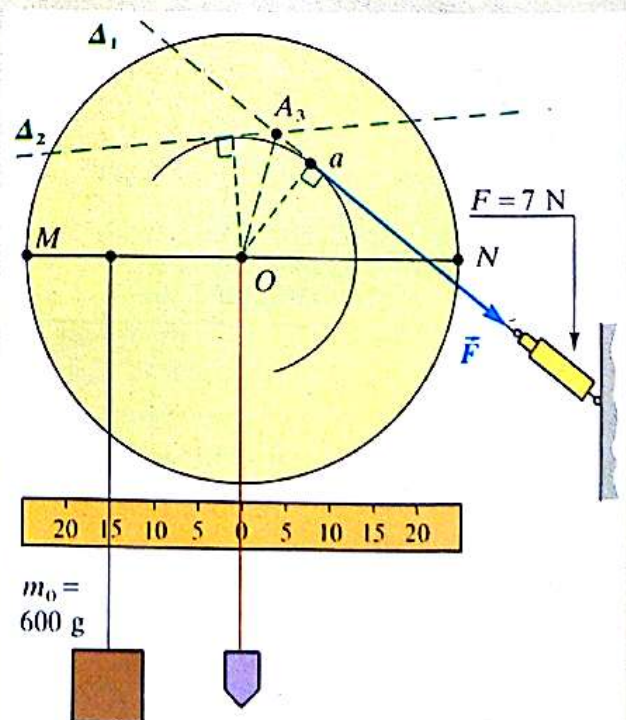
$$\mathcal{M}_{\Delta}(\vec{F}) = \mathcal{M}_{\Delta}(\vec{F}_1) = \dots = 0,9 \text{ N.m.}$$

Or $\mathcal{M}_{\Delta}(\vec{F}) = F \cdot d$; avec $F = 7 \text{ N}$, il vient :

$$d = \frac{0,9}{7} = 0,13 \text{ m.}$$

- 2/ Le fil tendu passe par le point A_3 et est distant de 0,13 m de l'axe de rotation qui passe par O . Réalisons un schéma à l'échelle 1/10 et traçons un cercle de centre O , de rayon $0,13/10 = 1,3 \text{ cm}$. Passant par A_3 , deux droites Δ_1 et Δ_2 peuvent être

tracées, tangentes au cercle. Le fil lié en A_3 pourra être tendu selon Δ_1 ou Δ_2 au choix, la force \vec{F} étant orientée vers la droite.



Application 2 :

Pour débloquer l'un des écrous qui fixe la roue de sa voiture, une personne exerce sur la manivelle une force \vec{F} verticale d'intensité 400 N, la manivelle faisant un angle $\alpha = 45^\circ$ avec la verticale. Sachant que la longueur ℓ de la manivelle est égale à 20 cm, calculer le moment de la force \vec{F} . Avec cette même force, pour quelle position de la manivelle le moment est-il le plus grand?

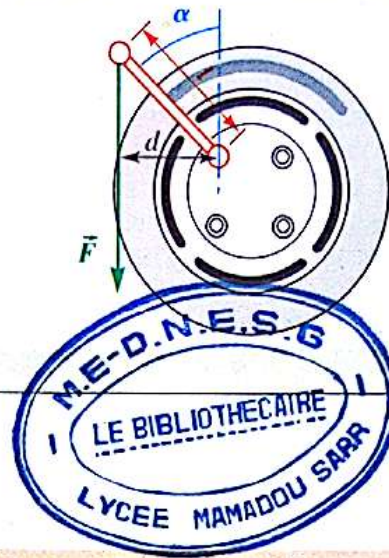
Nous connaissons l'intensité de la force \vec{F} ; il faut calculer le bras de levier :

$$d = \ell \cdot \sin \alpha = 0,20 \times 0,707 = 0,14 \text{ m.}$$

$$\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}) = F \cdot d = F \cdot \ell \cdot \sin \alpha = 400 \times 0,14 \approx 56 \text{ N.m.}$$

Le moment est le plus fort lorsque la manivelle est horizontale; en effet alors $d = \ell$, et :

$$\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}) = F \cdot \ell = 400 \times 0,20 = 80 \text{ N.m.}$$



22.2.3 cas d'une force non orthogonale à l'axe

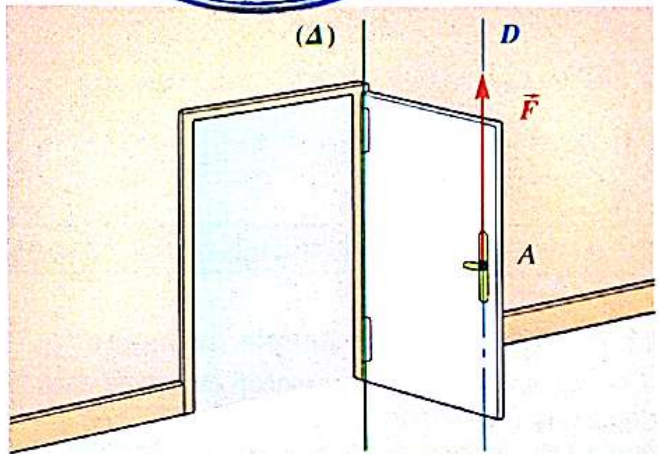
Une action mécanique exercée sur une porte immobile permet généralement de la faire tourner autour de l'axe de ses gonds. Cependant, une force \vec{F} exercée parallèlement à l'axe Δ (fig. 2), si elle permet de sortir la porte de ses gonds, ne peut la faire tourner.

- Une force dont le support est parallèle à l'axe ne peut provoquer la rotation d'un solide autour de cet axe. Son moment, par rapport à cet axe, est nul.

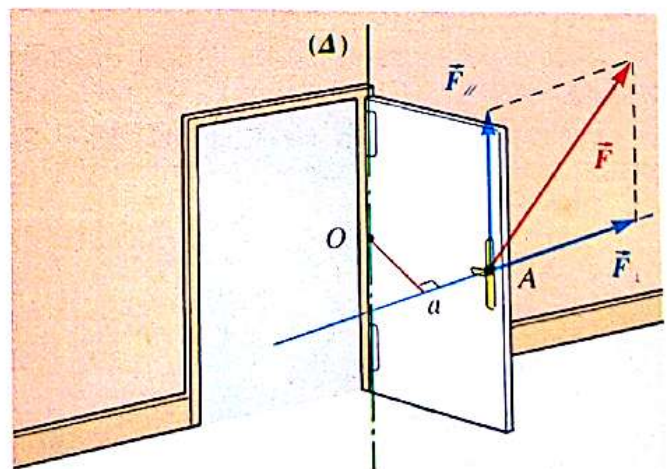
Pour déterminer le moment d'une force (A, \vec{F}) dont l'orientation par rapport à l'axe de rotation Δ est quelconque, on peut décomposer cette force en deux forces : (A, \vec{F}_\parallel) parallèle à l'axe et (A, \vec{F}_\perp) perpendiculaire à l'axe (fig. 3). Le moment de \vec{F}_\parallel étant nul :

$$\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}) = \mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_\perp) = F_\perp \cdot Oa.$$

En particulier, si le support de la force \vec{F} rencontre l'axe, $\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}) = 0$ car $Oa = 0$ dans ce cas. Une force dont le support rencontre l'axe ne peut provoquer la rotation d'un solide autour de cet axe; son moment, par rapport à cet axe, est nul (fig. 4).

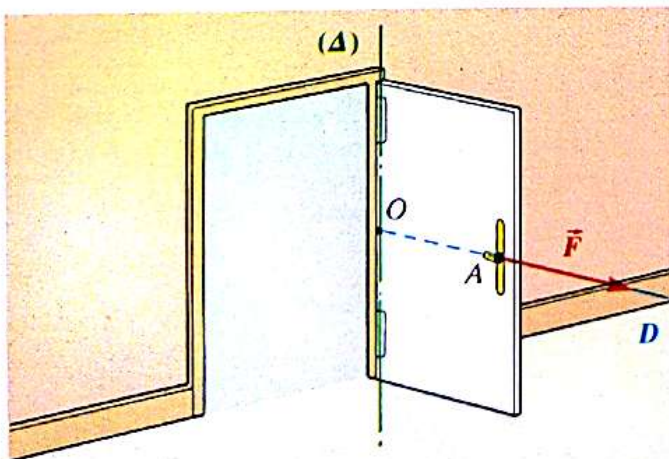


2. La force \vec{F} , parallèle à l'axe (Δ) , ne peut provoquer la rotation de la porte. Son moment par rapport à l'axe est nul.



3. La force \vec{F} , d'orientation quelconque par rapport à (Δ) , est décomposée en \vec{F}_\parallel et \vec{F}_\perp respectivement parallèle et perpendiculaire à l'axe :

$$\vec{F} = \vec{F}_\parallel + \vec{F}_\perp \text{ avec } \mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_\parallel) = 0, \text{ d'où : } \mathcal{M}_\Delta(\vec{F}) = \vec{F}_\perp \cdot Oa.$$



4. En tirant de la sorte sur la porte, on ne provoque pas sa rotation; le support de la force rencontre l'axe (Δ) , $d = 0$, et :

$$\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}) = F \cdot d = 0.$$

22.3 le moment, grandeur algébrique

Utilisons à nouveau un disque mobile autour d'un axe horizontal. Sur la figure ci-contre, la force \vec{F}_0 tend à faire tourner le disque dans un sens, tandis que la force \vec{F}_1 tend à le faire tourner dans l'autre sens.

Pour marquer cette différence, nous allons associer un **signe** au moment d'une force par rapport à un axe.

A cette fin nous choisissons, arbitrairement, un sens positif de rotation autour de l'axe, le sens des aiguilles d'une montre par exemple. Le moment d'une force appliquée au disque sera positif si cette force tend à faire tourner le disque dans le sens positif et négatif si cette force tend à le faire tourner dans l'autre sens.

Ainsi sur la figure, $\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_1)$ est positif alors que $\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_0)$ est négatif.

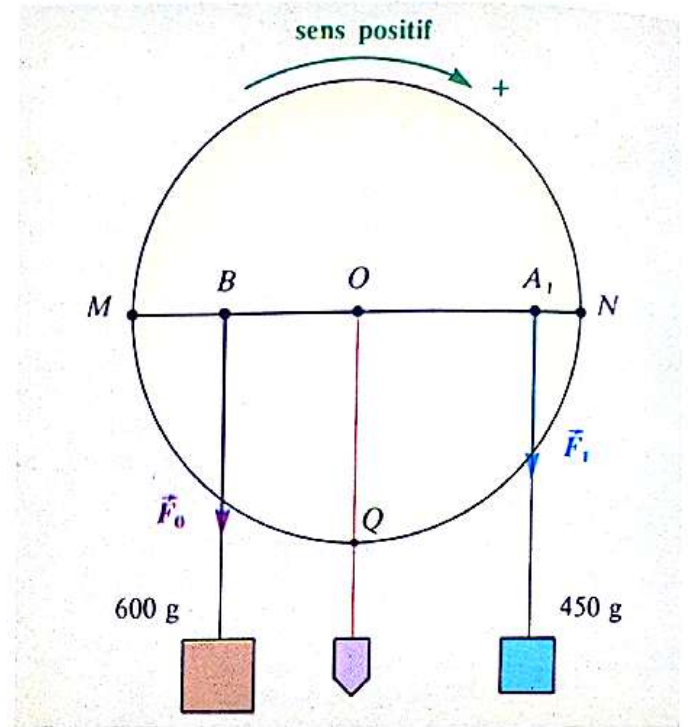
Le signe du moment dépend du sens positif choisi.

- Si \vec{F} tend à faire tourner le solide dans le sens positif choisi, alors :

$$\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}) = F \cdot d.$$

- Si \vec{F} tend à faire tourner le solide dans l'autre sens :

$$\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}) = -F \cdot d.$$



22.4 moment d'un couple de forces

22.4.1 définition d'un couple de forces

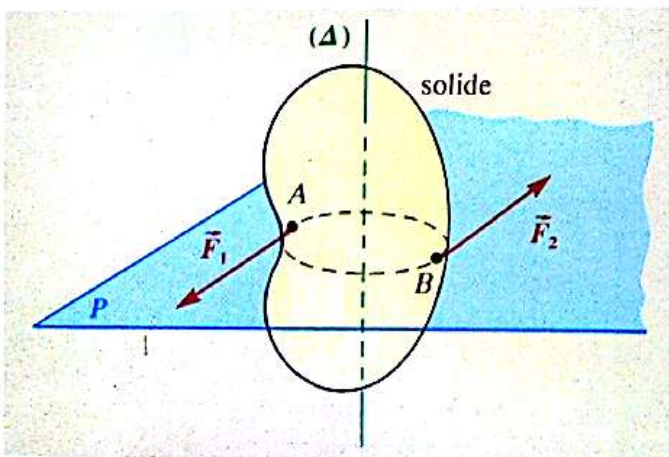
Nous avons déjà parlé de la notion de couple dans le chapitre 20 (*application 1*).

Un système de deux forces parallèles, de sens contraire, de même intensité et n'ayant pas le même support, constitue un couple (*fig. 5*) :

$$(\vec{F}_1, \vec{F}_2) \text{ couple} \iff \begin{cases} \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{0} \\ \text{supports différents} \end{cases}$$

Les supports des forces définissent un plan P , appelé *plan du couple*.

Un couple produit, sur les corps, un mouvement de rotation sans modifier la quantité de mouvement.



5. Le système des deux forces parallèles \vec{F}_1 et \vec{F}_2 , de sens contraire, de même intensité et n'ayant pas le même support, constitue un couple.

22.4.2 moment d'un couple

Considérons un couple appliqué à un solide, un disque par exemple, en rotation autour d'un axe fixe Δ passant par O . Nous n'envisagerons que le cas où le plan P du couple est perpendiculaire à l'axe de rotation : les forces sont donc orthogonales à l'axe (fig. 6).

Après avoir choisi un sens positif de rotation, déterminons les moments des forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 par rapport à Δ . Ces deux moments tendent, dans le cas de la figure, à provoquer une rotation dans le même sens; ils ont un même signe, positif :

$$\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_1) = F_1 \cdot Oa_1 \quad \text{et} \quad \mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_2) = F_2 \cdot Oa_2.$$

La somme de ces deux moments est appelée moment du couple.

Notons $F = F_1 = F_2$ l'intensité commune aux deux forces; il vient :

$$\mathcal{M}_\Delta = \mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_1) + \mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_2) = F \cdot Oa_1 + F \cdot Oa_2$$

$$\mathcal{M}_\Delta = F \cdot (Oa_1 + Oa_2) = F \cdot d,$$

d étant la distance entre les deux supports.

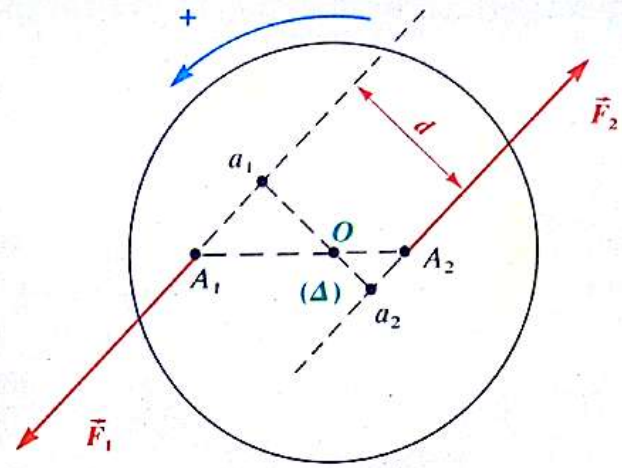
Cette expression est également valable dans le cas d'un couple de deux forces qui tendent à faire tourner un solide chacune en sens contraire (voir application 3 ci-dessous).

- Le moment \mathcal{M}_Δ d'un couple par rapport à un axe Δ perpendiculaire au plan du couple est mesurée par le produit de l'intensité commune des deux forces par la distance entre leur support :

$$\mathcal{M}_\Delta = F \cdot d.$$

L'unité est le newton-mètre (symbole : N.m).

Remarquons que la position de l'axe Δ n'intervient pas dans l'expression du moment d'un couple.



6. Le moment du couple par rapport à l'axe (Δ) est égal au produit de l'intensité commune F des deux forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 par la distance d entre leur support :

$$\mathcal{M}_\Delta = F \cdot d.$$

Application 3 :

Soit un couple de force (\vec{F}_1, \vec{F}_2) exercée, comme indiqué ci-dessous, sur une tige mobile autour d'un axe Δ horizontal qui passe par le point O . Montrer que le moment de ce couple a bien l'expression établie précédemment. Que devient ce moment si on change l'orientation du sens positif?

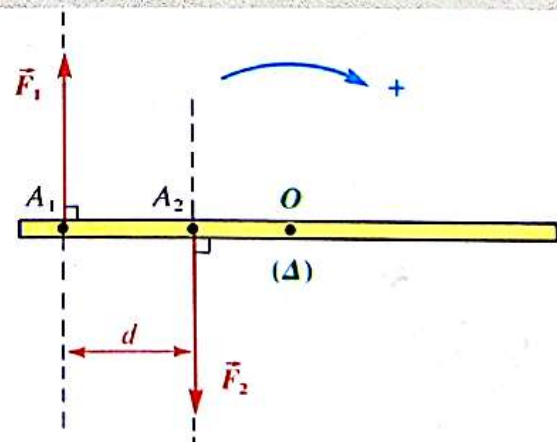
Avec le sens positif de rotation indiqué, nous avons :

$$\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_1) = F_1 \cdot OA_1 \quad \text{et} \quad \mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_2) = -F_2 \cdot OA_2.$$

Donc :

$$\mathcal{M}_\Delta = F_1 \cdot OA_1 - F_2 \cdot OA_2 = F \cdot (OA_1 - OA_2) = F \cdot d.$$

Le moment d'un couple est caractéristique de ce couple; la position de l'axe n'intervient pas.



Si l'on change l'orientation, la mesure algébrique du moment change de signe.

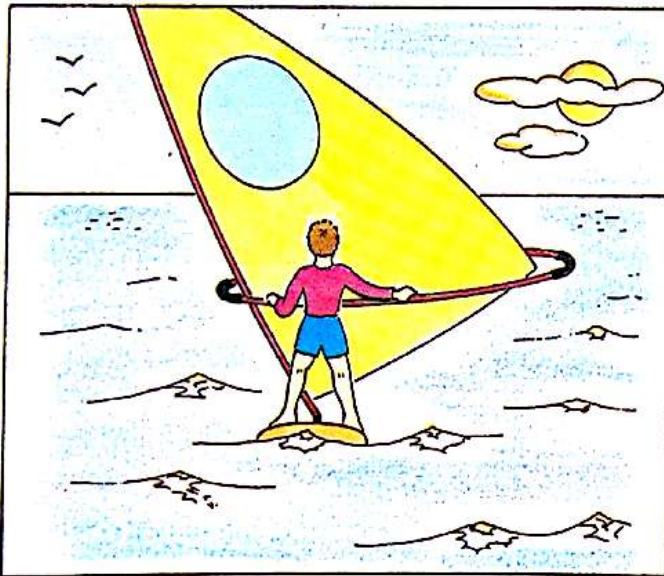
DOCUMENT

Lundi

Essayez d'abord de tenir sur le flotteur. Principe d'Archimède oblige, il suffit que la planche soit assez volumineuse pour supporter votre poids. Les planches courantes offrent toujours un volume suffisant (environ 250 litres). Le seul problème consiste à maintenir le centre de gravité (où s'applique le poids) à la verticale du centre de carène (où s'exerce la poussée d'Archimède). Dès que le planchiste se déplace, les deux points ne sont plus alignés verticalement et la chute devient inévitable...

Mardi

Ce problème est maîtrisé mais la planche n'avance pas encore. Si le vent vient de l'arrière, il suffit de disposer la voile en travers; ça marche et c'est facile, mais on s'aperçoit vite qu'il faut rejoindre le point de départ. C'est l'heure du retour à la brasse! un bras pour nager, l'autre pour pousser la planche, quand on ne sait pas encore remonter au vent.

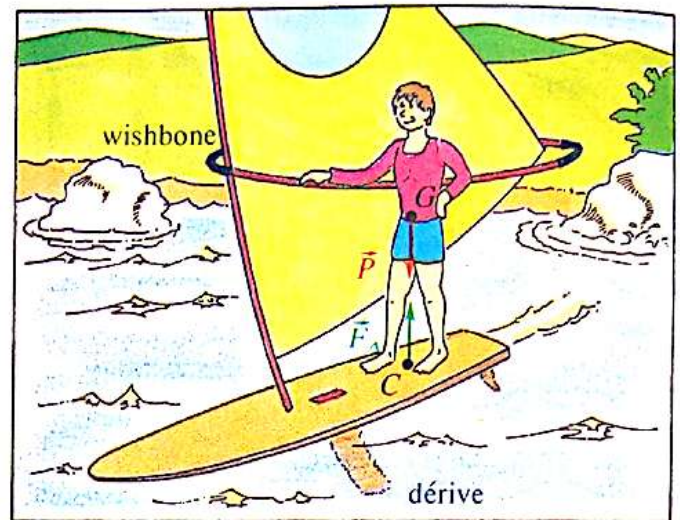


Au vent arrière, il suffit de disposer la voile en travers. C'est tout simple et facile... Mais attention, il faudra revenir contre le vent.

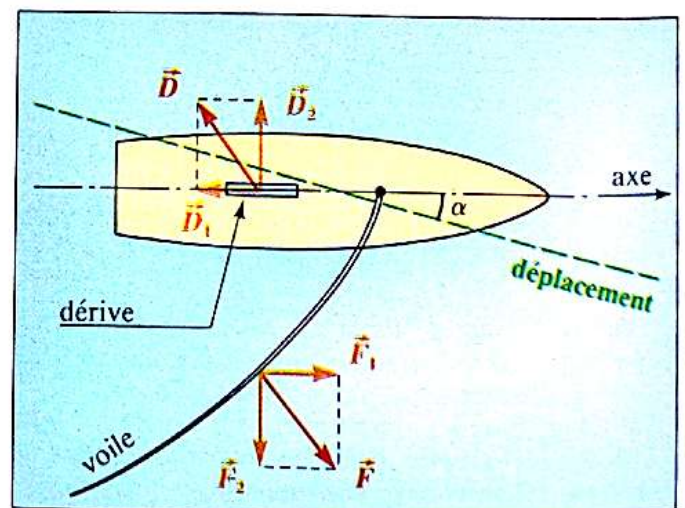
Mercredi

Tentons maintenant le vent de travers. La voile est soumise aux actions de contact dues à l'air : compressions et dépressions se conjuguent pour donner naissance à une force \vec{F} de direction sensiblement perpendiculaire à la voile. Si elle n'était pas dotée d'une dérive, la planche se déplacerait dans le sens de cette force. Les effets combinés du vent sur la voile et de l'eau sur la dérive permettent alors à la planche d'avancer — enfin! — dans la direction choisie.

Apprendre la planche



G est le centre de gravité du planchiste, où s'exerce la force \vec{P} qui représente le poids. C est le centre de carène, c'est-à-dire le centre de gravité du volume immergé de la planche. La poussée d'Archimède \vec{F}_A s'exerce en C . Une seule solution pour éviter la chute : maintenir G à la verticale de C .



La force résultante \vec{F} exercée par l'air sur la voile se décompose en \vec{F}_1 , composante propulsive, et \vec{F}_2 , composante transversale qui tend à faire chuter le planchiste. La planche se déplace dans l'eau avec un léger angle α (angle de dérive) par rapport à son axe. De ce fait, l'eau exerce sur la dérive une force \vec{D} comme il est indiqué. \vec{D} peut être décomposée en \vec{D}_1 , qui s'ajoute à la résistance à l'avancement, et \vec{D}_2 , force anti-dérive qui, en s'opposant à \vec{F}_2 , empêche la planche de dériver dans la direction de \vec{F} .

DOCUMENT

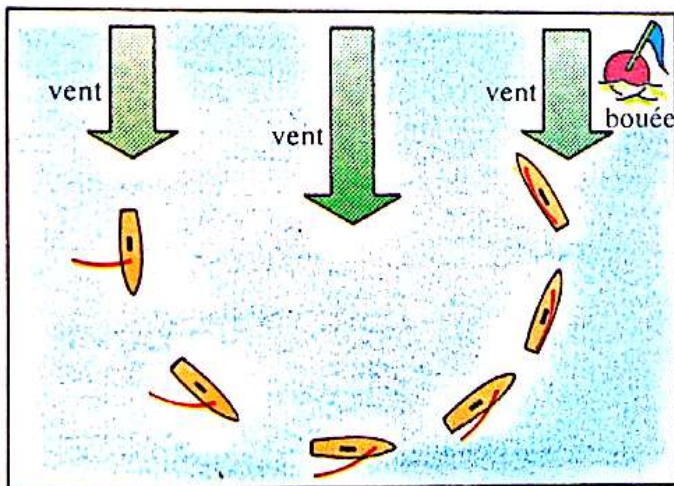
... en six jours

Jeudi

Il faut apprendre à basculer son corps vers l'extérieur pour combattre le couple de chavirement engendré par l'action combinée de la voile et de la dérive. Cette technique une fois maîtrisée, tout ira mieux.

Vendredi

Apprenons à bien manier la voile. Il faut d'abord la maintenir en drapeau puis l'amener progressivement vers l'axe de la planche : la voile est « bordée ». Dès qu'elle a cessé de faser (battre), elle prend le vent et entraîne l'ensemble. L'orientation de la voile par rapport à la planche dépend de la direction du vent : de l'arrière, le wishbone est perpendiculaire à la planche; de l'avant, il faut border la voile vers l'axe de la planche... Quand on ne peut plus remonter au vent, il faut « tirer des bords ».

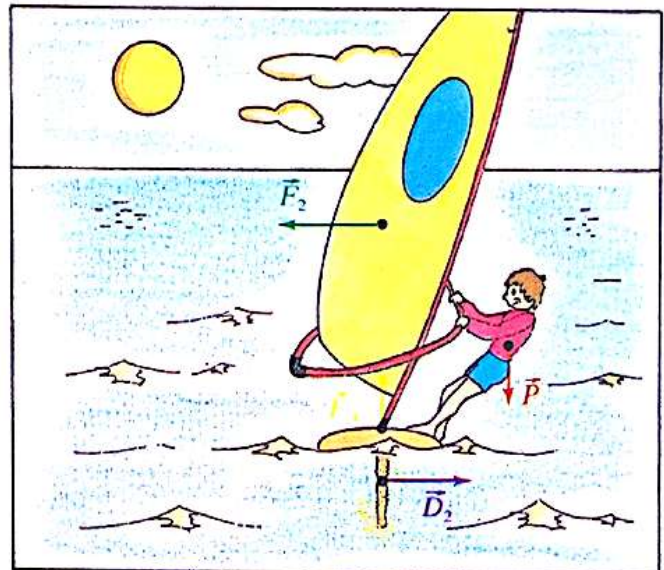


L'orientation de la planche dépend des directions de la voile et du vent. Au vent arrière, la voile est disposée en travers par rapport au vent. A mesure que le planchiste se rapproche de la direction du vent, il doit « border » sa voile de plus en plus près de l'axe de la planche. Pour atteindre la bouée, il faut louvoyer pour remonter au vent.

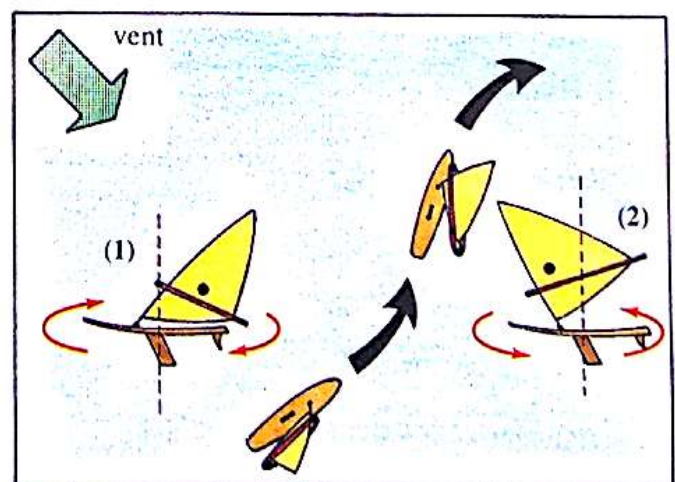
Samedi

Il ne reste plus qu'à se diriger. En basculant légèrement vers l'avant le grément (mât et voile), la poussée développée par la voile est avancée par rapport à celle que développe la dérive : la planche s'écarte du lit du vent (elle abat); lorsque le grément est basculé vers l'arrière, la planche se rapproche de la direction du vent (elle lofe).

D'après « Ça m'intéresse », juin 84.



(\vec{D}_1, \vec{D}_2) d'une part, (\vec{F}_1, \vec{F}_2) d'autre part ne sont pas coplanaires. \vec{D}_2 et \vec{F}_2 constituent un couple qui peut faire chavirer la planche, jusqu'à ce que le planchiste comprenne qu'en s'écartant vers l'extérieur de la planche, il crée un autre couple de forces (grâce à la poussée d'Archimède \vec{F}_A et à son poids \vec{P}) qui s'oppose au couple de chavirement.



(1) Grément basculé vers l'arrière, la poussée développée par la voile est en arrière de celle que développe la dérive : la planche se dirige vers le vent.

(2) Grément basculé vers l'avant, la poussée développée par la voile est en avant de celle que développe la dérive : la planche s'écarte de la direction du vent.

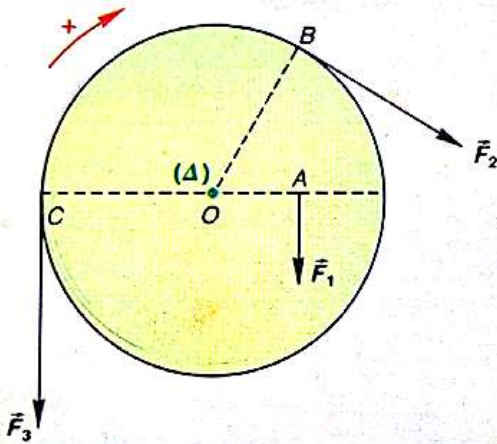
Faire le point

- Qu'appelle-t-on force orthogonale à un axe?
- Qu'appelle-t-on moment par rapport à un axe Δ d'une force orthogonale à un axe?
- Dans quelles conditions le moment d'une force par rapport à un axe est-il nul?
- Le signe du moment d'une force dépend-il du choix du sens positif de rotation autour de l'axe?
- Quelle est l'unité de moment?

22.1 Sur un disque mobile autour d'un axe Δ , on exerce les trois forces \vec{F}_1 , \vec{F}_2 et \vec{F}_3 représentées à l'échelle 1 cm \leftrightarrow 20 N. Le rayon du disque est égal à 20 cm.

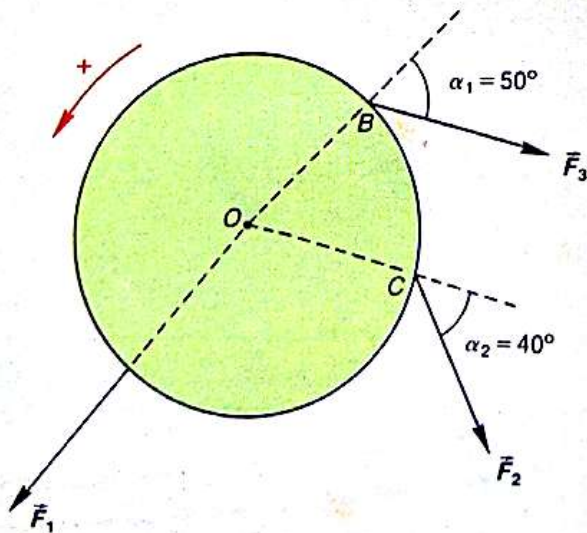
1/ Calculer le moment de ces trois forces par rapport à l'axe Δ .

2/ Calculer la somme algébrique de ces moments par rapport à l'axe Δ .



22.1

22.2 Sur un disque de rayon 20 cm, on exerce des forces d'intensité égale à 30 N et situées dans le plan vertical du disque. Calculer le moment de ces forces par rapport à un axe passant par O, centre du disque, et perpendiculaire au plan du disque.



22.2

22.3 Un solide S est mobile autour d'un axe fixe O . On exerce sur ce solide une force \vec{F} orthogonale à l'axe.

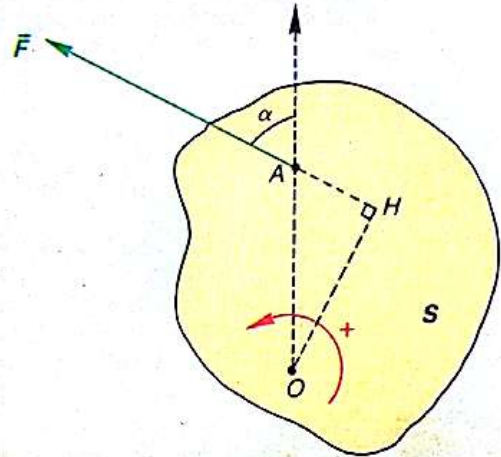
1/ $F = 100$ N; $OH = 15$ cm : calculer $\mathcal{M}_O(\vec{F})$.

2/ $F = 250$ N; $OA = 20$ cm; $\alpha = 40^\circ$: calculer $\mathcal{M}_O(\vec{F})$.

3/ $\mathcal{M}_O(\vec{F}) = 3400$ N.m; $OH = 30$ cm : calculer F .

4/ $\mathcal{M}_O(\vec{F}) = -68$ N.m; $OA = 50$ cm; $F = 300$ N : calculer α .

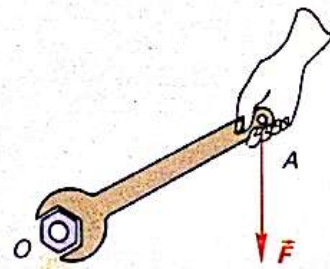
5/ $\alpha = 210^\circ$; $\mathcal{M}_O(\vec{F}) = -90$ N.m; $OA = 30$ cm : calculer F .



22.3

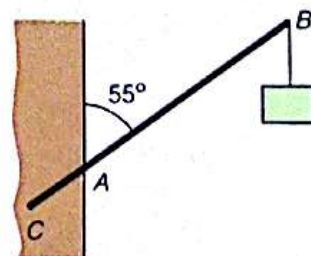
22.4 Pour serrer un écrou, on peut considérer que la main exerce une force appliquée en un point A de l'extrémité de la clef. L'axe Δ de rotation de l'écrou est horizontal; la force est située dans le plan orthogonal à l'axe de l'écrou, de direction verticale. Calculer le moment de cette force par rapport à l'axe (O, Δ).

Données : $(\widehat{AO, \vec{F}}) = 50^\circ$; $AO = 20$ cm; $F = 20$ N.



22.4

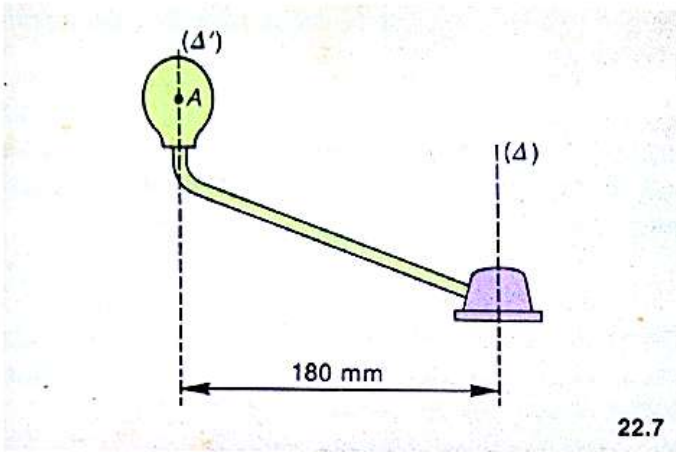
22.5 Une tige de poids négligeable est encastree dans un mur; elle supporte en B une charge de poids 2500 N. Calculer le moment de cette surcharge par rapport à un axe horizontal passant par le point d'encastrement A. On donne : $AB = 1,5$ m.



22.5

22.6 La droite d'action d'une force est à 30 cm d'un axe fixe auquel elle est orthogonale. Par rapport à cet axe, le moment de cette force est de 18 N.m. Quelle est l'intensité de cette force?

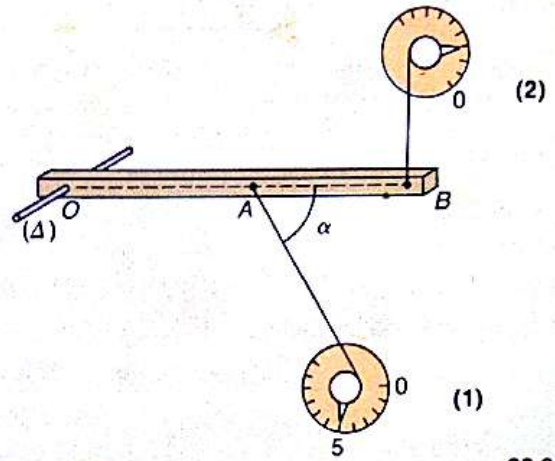
22.7 Un tourneur agit sur une manette de serrage; il exerce en A une force horizontale d'intensité 80 N. Quelle doit être la direction de cette force pour que son moment par rapport à l'axe Δ soit maximal? Déterminer alors ce moment.



22.7

22.9 Une règle de poids négligeable, mobile autour d'un axe (O, Δ) horizontal, est soumise à l'action de deux dynamomètres, situés dans le même plan vertical passant par O. Le dynamomètre (1) indique 5 N à l'équilibre. Quelle est l'indication du dynamomètre (2), sachant que la somme algébrique des deux moments est nulle.

Données : $OA = 24$ cm; $OB = 42$ cm; $\alpha = 60^\circ$.



22.9

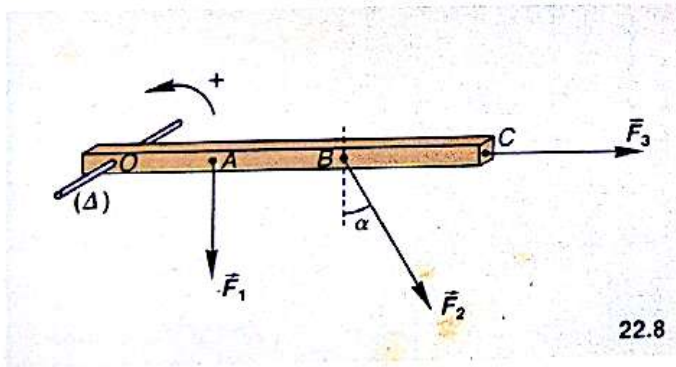
22.8 Sur une règle horizontale, mobile autour d'un axe horizontal (O, Δ) , on exerce dans un même plan vertical trois forces d'intensité respective :

$$F_1 = 17 \text{ N}, F_2 = 25 \text{ N} \text{ et } F_3 = 23 \text{ N}.$$

On donne : $OA = 16$ cm; $OB = 37$ cm; $OC = 60$ cm; $\alpha = 30^\circ$.

1/ Calculer les moments algébriques de ces trois forces par rapport à l'axe Δ .

2/ Calculer leur somme par rapport à l'axe Δ .

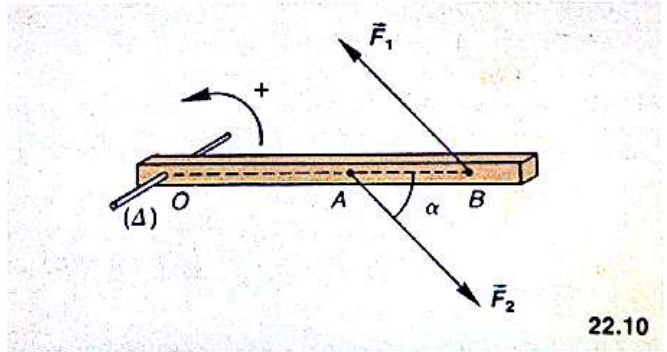


22.8

22.10 \vec{F}_1 et \vec{F}_2 sont deux forces de direction parallèle mais de sens contraire, de même intensité égale à 30 N. Elles agissent sur la barre qui peut tourner autour d'un axe (O, Δ) perpendiculaire à leur plan.

Calculer la somme algébrique des moments de ces deux forces par rapport à l'axe Δ . Cette somme dépend-elle de la position de O par rapport à A et B?

Application numérique : $AB = 20$ cm; $\alpha = 45^\circ$.



22.10

Équilibre d'un solide mobile autour d'un axe fixe

23.1 théorème des moments

Un disque capable de tourner sans frottement autour d'un axe fixe horizontal Δ est maintenu en équilibre sous l'action de plusieurs forces exercées par des fils tendus (voir fiche expérimentale ci-contre). Le centre de gravité (et d'inertie) G du disque est confondu avec le point O , traversé par l'axe Δ .

Faisons le bilan des forces appliquées au disque :

- le poids \vec{P} du disque;
- les forces \vec{F}_0 , \vec{F}_1 et \vec{F}_2 exercées par les fils tendus;
- les forces de contact exercées par l'axe sur le disque, équivalentes à une force \vec{R} dont le support passe par O .

L'étude expérimentale ci-contre montre que lorsque le disque ne tourne pas autour de son axe Δ , la somme algébrique des moments des forces appliquées est nulle; les forces compensent leurs effets quant à la rotation.

$$\mathcal{M}_\Delta(\vec{P}) + \mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_0) + \mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_1) + \mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_2) + \mathcal{M}_\Delta(\vec{R}) = 0.$$

Ce résultat se généralise; c'est une condition nécessaire de non rotation autour d'un axe Δ , connue sous le nom de *théorème des moments* :

- Lorsqu'un solide, mobile autour d'un axe fixe, est en équilibre, la somme algébrique des moments, par rapport à cet axe, de toutes les forces extérieures appliquées à ce solide est nécessairement nulle :

$$\sum \mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_i) = 0.$$

Cette condition est nécessaire à l'équilibre car si elle n'est pas satisfaite, le solide ne peut être en équilibre; il tourne autour de son axe de rotation.

Mais cette condition n'est pas suffisante pour qu'il y ait équilibre. En effet lorsque cette condition est réalisée :

- soit le solide est effectivement en équilibre autour de son axe;
- soit le solide tourne autour de l'axe avec un mouvement de rotation uniforme.

Application 1 :

Une barre homogène AB de masse $m = 4 \text{ kg}$, de longueur 60 cm est mobile autour d'un axe horizontal Δ passant par le point O tel que $OA = 10 \text{ cm}$. Cette barre est maintenue en équilibre par la tension \vec{T} d'un ressort et la tension \vec{F}_1 d'un fil tendu par le poids \vec{P}_1 d'une masse $m_1 = 1 \text{ kg}$. On néglige les frottements sur l'axe.

Calculer T sachant que la direction du ressort est perpendiculaire à la barre et que cette dernière est inclinée d'un angle $\alpha = 60^\circ$ par rapport à l'horizontale.

Outre les forces indiquées par l'énoncé, la barre est soumise à son poids \vec{P} et à une force de contact \vec{R} exercée en O par l'axe Δ . Le moment par rapport à Δ de cette dernière force est nul en l'absence de frottement : $\mathcal{M}_\Delta(\vec{R}) = 0$.

La condition nécessaire d'équilibre s'écrit :

$$\mathcal{M}_\Delta(\vec{R}) + \mathcal{M}_\Delta(\vec{P}) + \mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_1) + \mathcal{M}_\Delta(\vec{T}) = 0. \quad (1)$$

Orientons dans le sens trigonométrique et déterminons les moments :

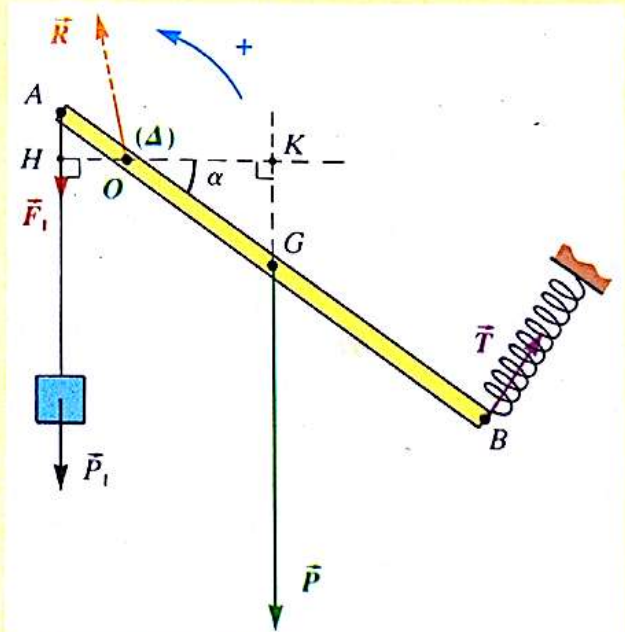
$$\mathcal{M}_\Delta(\vec{P}) = -m \cdot g \cdot OK = -m \cdot g \cdot OG \cdot \cos \alpha,$$

$$\mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_1) = +F_1 \cdot OH = m_1 \cdot g \cdot OA \cdot \cos \alpha,$$

$$\mathcal{M}_\Delta(\vec{T}) = +T \cdot OB.$$

La relation (1) s'écrit :

$$-m \cdot g \cdot OG \cdot \cos \alpha + m_1 \cdot g \cdot OA \cdot \cos \alpha + T \cdot OB = 0.$$



Seule T est inconnue :

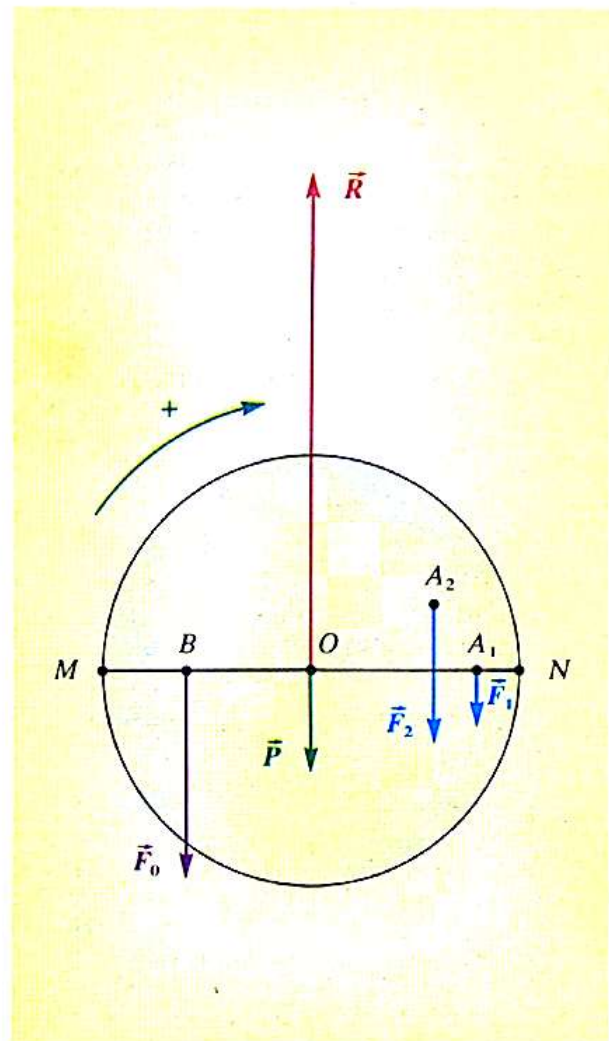
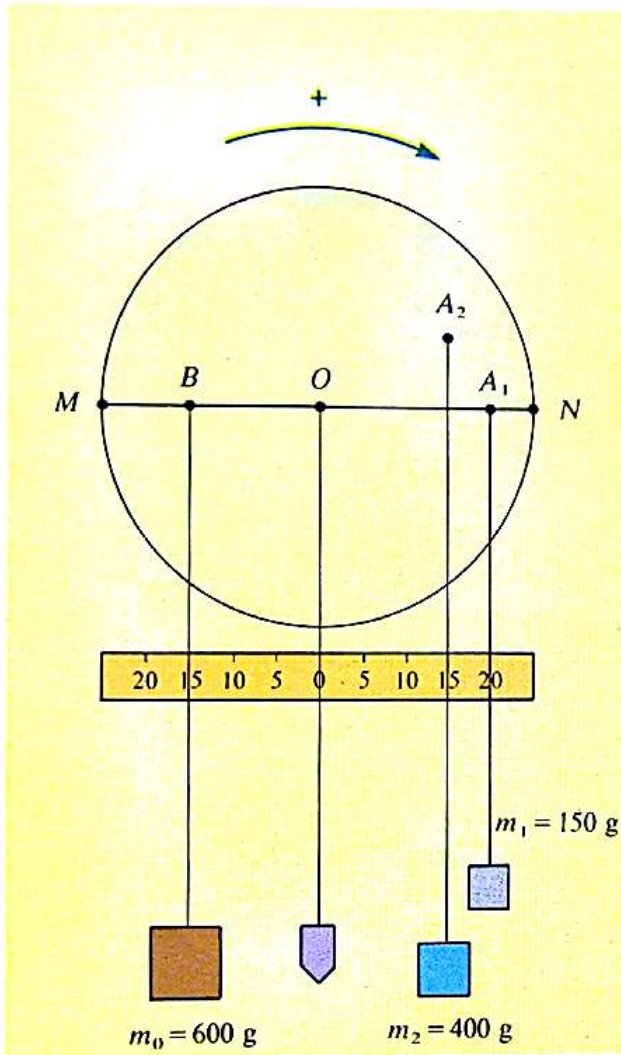
$$T = \frac{g \cdot \cos \alpha (m \cdot OG - m_1 \cdot OA)}{OB}$$

La barre est homogène : G est au milieu de AB , et $OG = AG - AO = 0,2 \text{ m}$:

$$T = \frac{10 \times 0,87 (4 \times 0,2 - 1 \times 0,1)}{0,5} = 12,2 \text{ N}.$$

Fiche expérimentale

équilibre d'un disque mobile autour d'un axe horizontal



Nous nous proposons d'étudier l'équilibre d'un disque mobile autour d'un axe horizontal. Nous supposons que les frottements autour de l'axe sont négligeables. Le centre de gravité du disque est situé en O sur l'axe.

Faisons le bilan des forces appliquées au disque :

— le poids \vec{P} du disque, dont la droite d'action verticale passe par l'axe;

— les forces \vec{F}_0 , \vec{F}_1 et \vec{F}_2 exercées par les fils tendus;

— la réaction \vec{R} exercée par l'axe sur le disque et dont la droite d'action verticale passe par l'axe.

Le disque ne tourne pas autour de l'axe Δ : ces forces compensent leurs effets quant à la rotation. Déterminons leur moment par rapport à l'axe après avoir choisi un sens positif de rotation.

- Les forces \vec{P} et \vec{R} rencontrent l'axe; leur moment est nul :

$$\mathcal{M}_{\Delta}(\vec{P}) = \mathcal{M}_{\Delta}(\vec{R}) = 0.$$

- La force \vec{F}_0 tend à faire tourner le disque dans le sens négatif :

$$\mathcal{M}_{\Delta}(\vec{F}_0) = -F_0 \cdot d_0 = -6 \times 0,15 = -0,9 \text{ N.m.}$$

- Les forces \vec{F}_1 et \vec{F}_2 ont des moments positifs :

$$\mathcal{M}_{\Delta}(\vec{F}_1) = F_1 \cdot d_1 = 1,5 \times 0,2 = +0,3 \text{ N.m.}$$

$$\mathcal{M}_{\Delta}(\vec{F}_2) = F_2 \cdot d_2 = 4 \times 0,15 = +0,6 \text{ N.m.}$$

Nous constatons, qu'à l'équilibre, la somme algébrique des moments, par rapport à l'axe, des forces appliquées au disque est nulle :

$$\mathcal{M}_{\Delta}(\vec{P}) + \mathcal{M}_{\Delta}(\vec{R}) + \mathcal{M}_{\Delta}(\vec{F}_0) + \mathcal{M}_{\Delta}(\vec{F}_1) + \mathcal{M}_{\Delta}(\vec{F}_2) = 0.$$

Application 2 :

On découpe un triangle dans du carton rigide. Son centre de gravité G est à l'intersection des médianes. On transperce, en un point O , le triangle S avec une aiguille à tricoter, qui sert d'axe horizontal de rotation Δ . On néglige les frottements entre l'aiguille et la plaque.

Déterminer les positions d'équilibre du triangle autour de Δ .

Le triangle est soumis aux forces de pesanteur réparties, assimilables à une force unique \vec{P} appliquée en G , et à la réaction \vec{R} exercée par l'axe de rotation.

Le support de \vec{R} rencontre l'axe, et $\mathcal{M}_\Delta(\vec{R}) = 0$. La somme des moments, par rapport à Δ , des forces appliquées au triangle vaut donc :

$$\mathcal{M}_\Delta(\vec{R}) + \mathcal{M}_\Delta(\vec{P}) = P \cdot d.$$

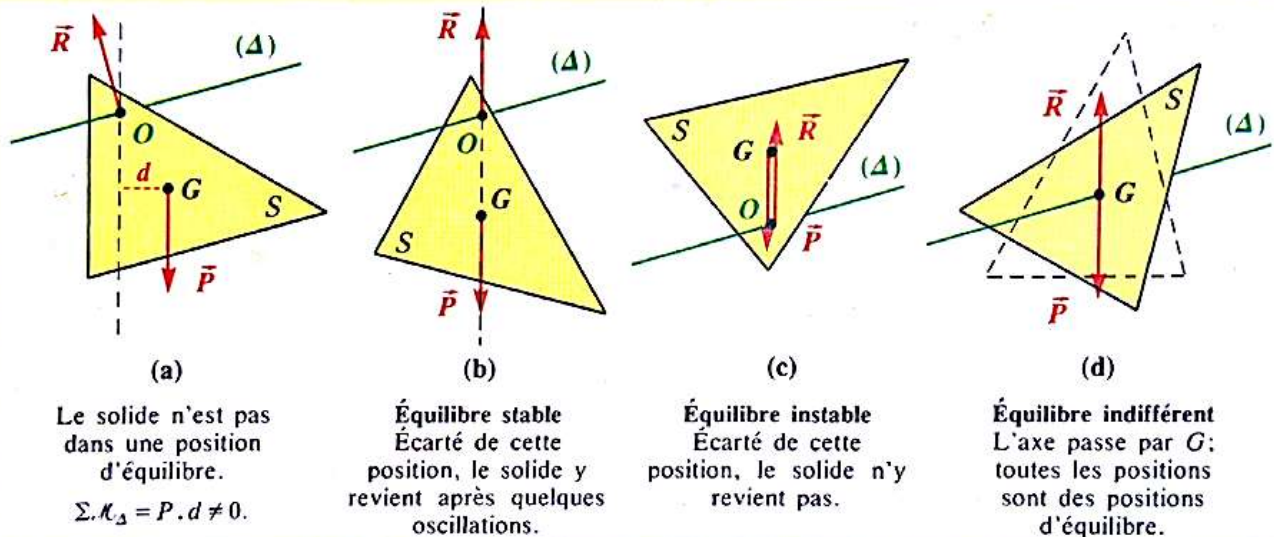
Cette somme est nulle si le bras de levier est nul ($d=0$). Dans ce cas, G est sur la verticale passant par O .

On obtient ainsi deux positions d'équilibre du triangle :

- un équilibre *stable*, où G est au-dessous de l'axe Δ (b);
- un équilibre *instable*, où G est au-dessus de l'axe Δ (c).

Dans le cas particulier où l'axe traverse le triangle en son centre de gravité (d), le moment du poids est toujours nul : l'équilibre est dit « *indifférent* ».

On peut notamment conclure de cette application qu'une roue de véhicule est « bien équilibrée » si son centre d'inertie coïncide avec l'axe de rotation. Pour ce faire, il est souvent nécessaire de fixer des petites masses de plomb en des endroits précis de la jante.

**23.2 conditions générales d'équilibre**

Lorsqu'un solide susceptible de tourner autour d'un axe fixe et soumis à plusieurs forces (forces localisées ou réparties, forces de contact ou s'exerçant à distance...) est en équilibre dans le référentiel terrestre, alors :

- La condition nécessaire de non rotation autour de l'axe est vérifiée :

1. La somme algébrique des moments par rapport à l'axe Δ est nulle :

$$\Sigma \mathcal{M}_\Delta(\vec{F}_i) = 0.$$

- Sa quantité de mouvement est nulle et reste nulle; son centre d'inertie est immobile. Donc, nécessairement :

2. La somme vectorielle des forces extérieures est nulle :

$$\Sigma \vec{F}_i = \vec{0}.$$

Ces deux conditions sont, ensemble, nécessaires à l'équilibre du solide.

Mais elles ne sont pas suffisantes, car elles n'assurent pas pour autant, si elles sont satisfaites, l'équilibre du solide.

Remarque : Dans le bilan des forces appliquées à un solide mobile autour d'un axe, il faut évidemment tenir compte des forces de contact de l'axe de rotation sur le solide. La résultante de ces forces de réaction est notée \vec{R} . S'il n'y a pas de frottement, le moment de ces forces de frottement est nul, ce que l'on note $\mathcal{M}_\Delta(\vec{R}) = 0$.

Ainsi, dans l'étude présentée dans la fiche expérimentale :

$$\mathcal{M}_\Delta(\vec{R}) = 0 \quad (\text{absence de frottement})$$

et $R + \vec{F}_0 + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{0}$.

\vec{R} est donc verticale, dirigée vers le haut, et

$$\begin{aligned} \|\vec{R}\| &= \|\vec{F}_0\| + \|\vec{F}_1\| + \|\vec{F}_2\| \\ &= 6 + 1,5 + 4 = 11,5 \text{ N.} \end{aligned}$$

Application 3 :

Une barre homogène de poids $P=4\text{ N}$ est mobile autour d'un axe fixe (O, Δ) , horizontal. La barre est orthogonale à l'axe. En un de ses points A , est accrochée une masse marquée, de poids P_1 . La barre prend une position d'équilibre. Soit $d_1=20\text{ cm}$ et $d_2=10\text{ cm}$ les distances entre l'axe (O, Δ) et les verticales passant par A et G . On néglige les frottements de l'axe.

1/ Calculer $\|\vec{P}_1\| = P_1$.

2/ Déterminer la réaction \vec{R} de l'axe en O .

1/ La barre est soumise à la force \vec{F} appliquée par la ficelle en A et égale à \vec{P}_1 , à son poids \vec{P} appliqué en G et à la réaction \vec{R} appliquée en O . Exprimons que la somme des moments de ces forces par rapport à l'axe est nulle :

$$\mathcal{M}_\Delta(\vec{P}) + \mathcal{M}_\Delta(\vec{F}) + \mathcal{M}_\Delta(\vec{R}) = 0,$$

soit, en prenant le sens des aiguilles d'une montre comme sens positif de rotation :

$$P \cdot d_2 - F \cdot d_1 + 0 = 0,$$

d'où :
$$P_1 = F = P \cdot \frac{d_2}{d_1}$$

Numériquement :
$$P_1 = 4 \times \frac{10}{20} = 2\text{ N}.$$

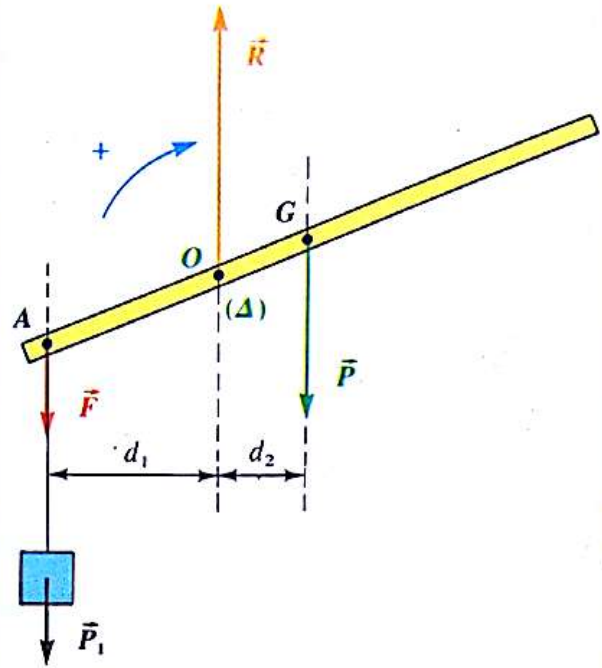
2/ Exprimons la condition nécessaire de non déplacement de G :

$$\vec{P} + \vec{F} + \vec{R} = \vec{0},$$

soit :
$$\vec{R} = -(\vec{P} + \vec{F}).$$

\vec{P} et \vec{F} ayant même direction, la verticale du lieu, et étant orientées de haut en bas, \vec{R} est donc une force appliquée en O , dirigée verticalement et orientée de bas en haut. Son intensité vaut :

$$R = \|\vec{R}\| = \|\vec{P} + \vec{F}\| = 6\text{ N}.$$

**Application 4 : Poulie sans frottement**

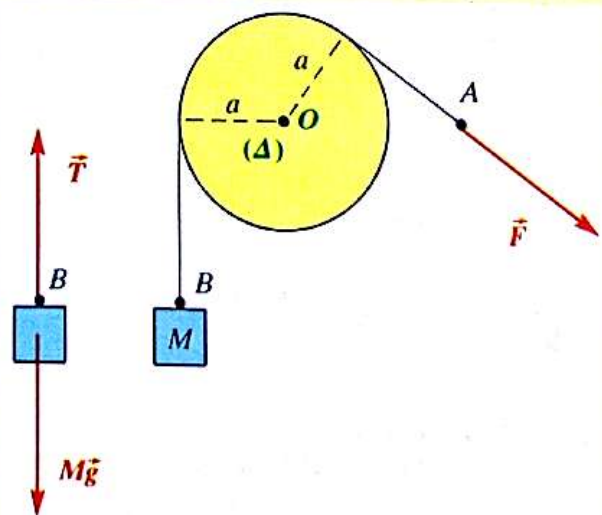
Une poulie de rayon a et de poids \vec{P} est mobile, sans frottement, autour d'un axe Δ horizontal passant par O . La réaction de l'axe est équivalente à une force \vec{R} appliquée en O . Sur cette poulie passe une corde qui soutient un objet de masse M . Montrer qu'à l'équilibre l'intensité de la force \vec{F} qu'il faut exercer en A est égale au poids de la masse M . On néglige le poids de la corde.

1. Considérons l'équilibre de la masse M . Elle est soumise à deux forces :

- son poids $M\vec{g}$;
- la tension \vec{T} du fil.

A l'équilibre :

$$\vec{T} + M\vec{g} = \vec{0} \implies T = \|\vec{T}\| = M \cdot \|\vec{g}\| = M \cdot g.$$



2. Considérons l'équilibre du système {corde + poulie}. Il est soumis :

- à l'action de la masse M sur la corde, qui d'après le Principe d'interaction vaut $-\vec{T}$;
- à l'action de la force \vec{F} appliquée en A ;
- à la réaction \vec{R} et au poids \vec{P} de la poulie, appliqués en O .

A l'équilibre, écrivons la condition de non rotation :

$\mathcal{M}_\Delta(-\vec{T}) + \mathcal{M}_\Delta(\vec{T}) + \mathcal{M}_\Delta(\vec{R}) + \mathcal{M}_\Delta(\vec{P}) = 0$,
soit en prenant le sens des aiguilles d'une montre comme sens positif de rotation :

$$-T \cdot a + F \cdot a + 0 + 0 = 0,$$

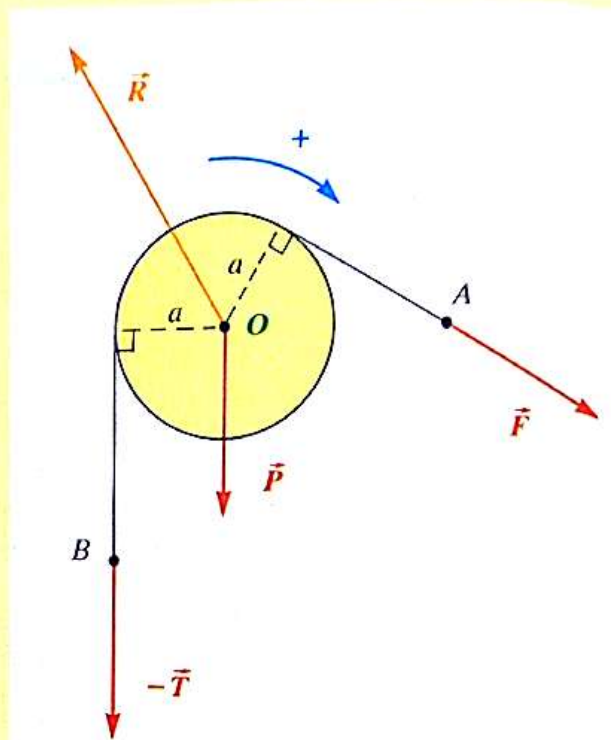
d'où : $F = T = M \cdot g$.

Nous retrouvons le fait qu'une poulie mobile autour d'un axe sans frottement change la direction d'une force sans en modifier l'intensité.

On peut remarquer par ailleurs que la seconde condition d'équilibre :

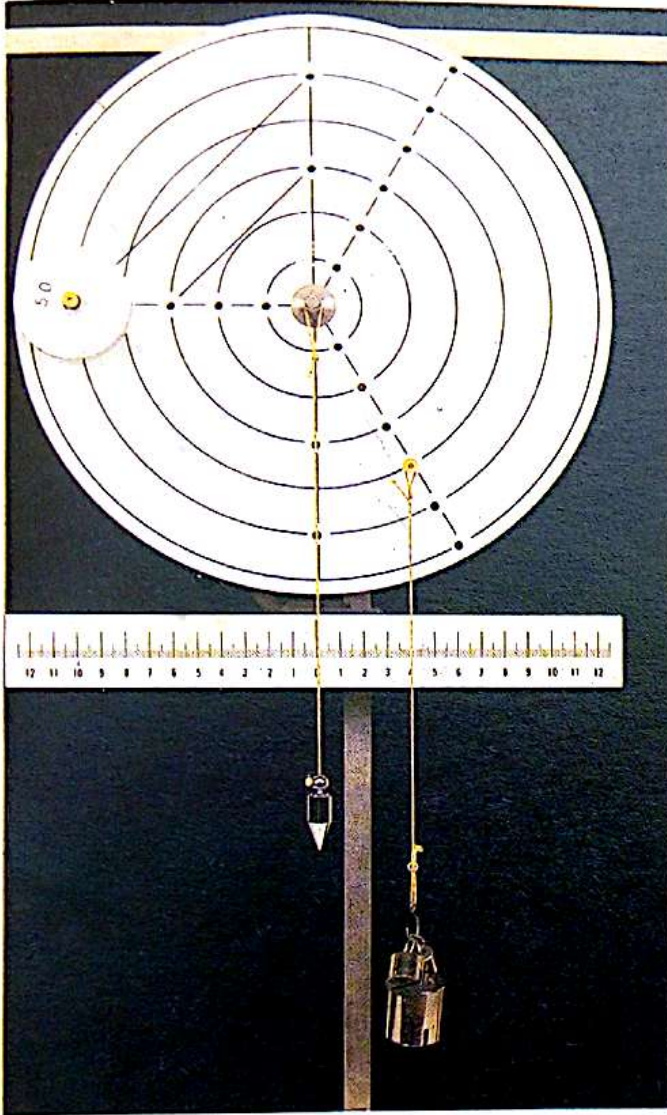
$$(-\vec{T}) + \vec{F} + \vec{R} + \vec{P} = \vec{0}$$

permettrait de calculer la réaction \vec{R} de l'axe.

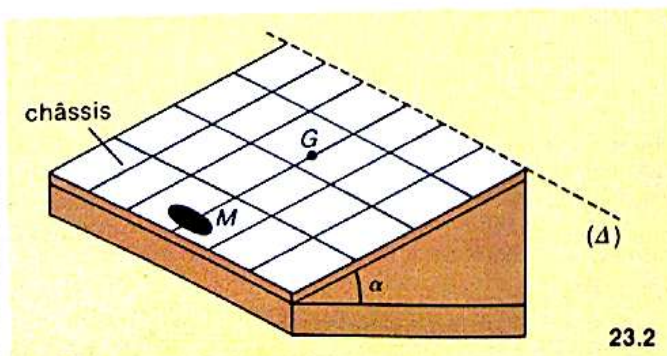


Application du théorème des moments

23.1 Énoncer le théorème des moments des forces appliquées au disque. Quelle est la masse suspendue au fil si la masse fixée au disque de la photographie est de 50 g? On admettra que le centre d'inertie du disque est situé sur l'axe de rotation.



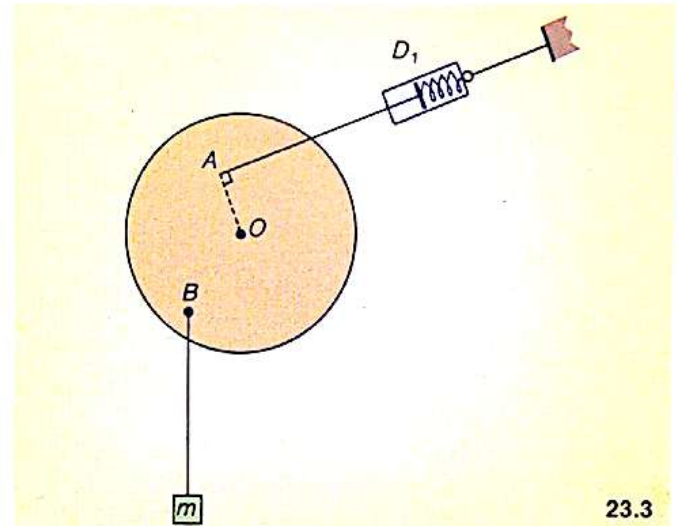
23.2 Un châssis de serre a une masse de 15 kg. Il est mobile autour d'un axe horizontal Δ et forme avec un plan horizontal un angle $\alpha = 35^\circ$. Son centre d'inertie G est à 60 cm de l'axe de rotation Δ et la poignée M servant à l'ouvrir est à 120 cm de cet axe. On applique en M une force perpendiculaire au plan du châssis.



1/ Calculer l'intensité de la force qu'il faut exercer au début de l'ouverture ($g = 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$).

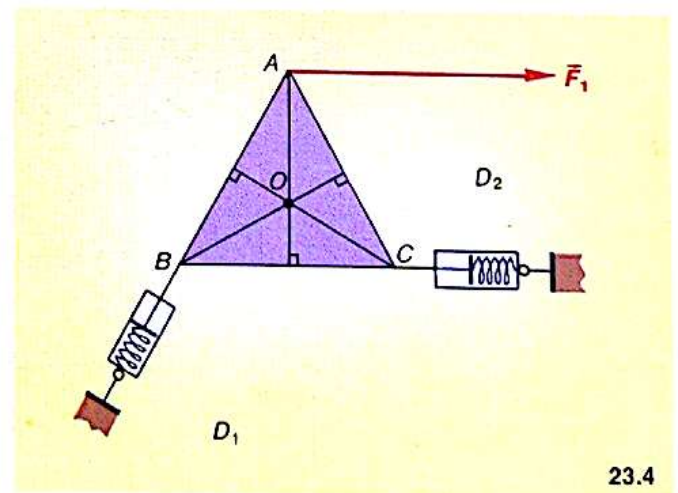
2/ Quelle valeur maximale cette force prend-elle au cours de l'ouverture?

23.3 Le disque ci-dessous, de poids 8 N, est mobile autour d'un axe fixe horizontal passant par son centre de gravité O . Dans le plan du disque, on dispose un dynamomètre D_1 accroché en A tel que $OA = 15 \text{ cm}$. En B , on suspend une masse m . La distance de O à la verticale passant par B est de 12 cm. A l'équilibre, le dynamomètre indique 5 N. Calculer le poids de la masse m .



23.4 Une plaque homogène, ayant la forme d'un triangle équilatéral, est mobile autour d'un axe horizontal, perpendiculaire au plan de la plaque et passant par O , point de concours des médianes. A l'aide des dynamomètres D_1 et D_2 , on exerce respectivement en B et C des forces dirigées suivant \overline{AB} et \overline{BC} .

D_1 indique 4 N et D_2 , 6 N. Calculer l'intensité de la force \vec{F}_1 qu'il faut exercer en A , de direction orthogonale à AO , pour maintenir la plaque en équilibre.



Forces parallèles

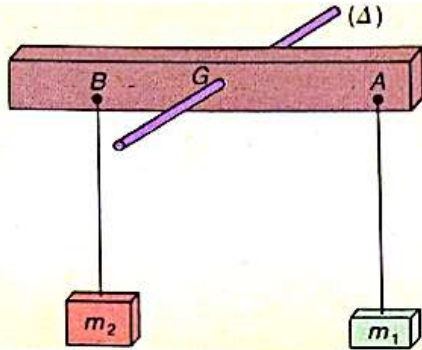
23.5 Une règle est mobile autour d'un axe Δ horizontal passant par son centre de gravité G . Par l'intermédiaire de fils, des masses marquées m_1 et m_2

sont accrochées en A et B tels que $GA = 15 \text{ cm}$ et $GB = 12 \text{ cm}$.

1/ La barre est horizontale. Calculer le moment par rapport à l'axe Δ de la force exercée en A. $m_1 = 150 \text{ g}$; $g = 9,8 \text{ N.kg}^{-1}$.

2/ La barre est en équilibre. En déduire la valeur de la masse marquée m_2 .

3/ On incline la règle d'un angle $\alpha < \frac{\pi}{2}$; est-elle encore en équilibre?



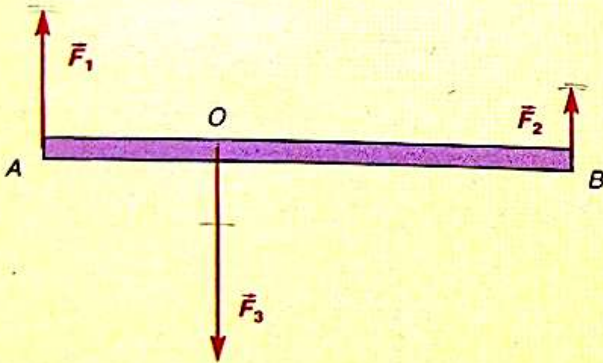
23.5

23.6 On exerce sur une règle horizontale de poids négligeable trois forces situées dans un plan vertical, de directions parallèles et d'intensités : $F_1 = 20 \text{ N}$; $F_2 = 10 \text{ N}$; $F_3 = 30 \text{ N}$.

- Calculer la résultante \vec{F} de ces forces.
- Calculer le moment résultant de ces forces par rapport à un axe horizontal perpendiculaire au plan contenant ces trois forces et passant par O, puis par A, puis par B. On choisira un sens positif arbitraire.

Données : $OA = 2 \text{ cm}$; $OB = 6 \text{ cm}$.

3/ Que peut-on dire de l'équilibre de la barre AB? du mouvement de la barre AB?

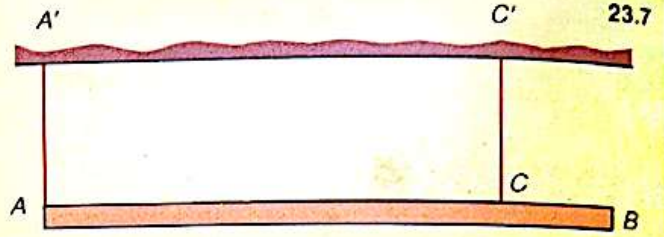


23.6

23.7 La barre homogène AB ci-après, de masse $m = 4 \text{ kg}$, est suspendue à l'aide de deux fils AA' et CC' de même longueur. La barre est horizontale, en équilibre. On donne $AB = 50 \text{ cm}$; $AC = 40 \text{ cm}$; $g = 10 \text{ N.kg}^{-1}$.

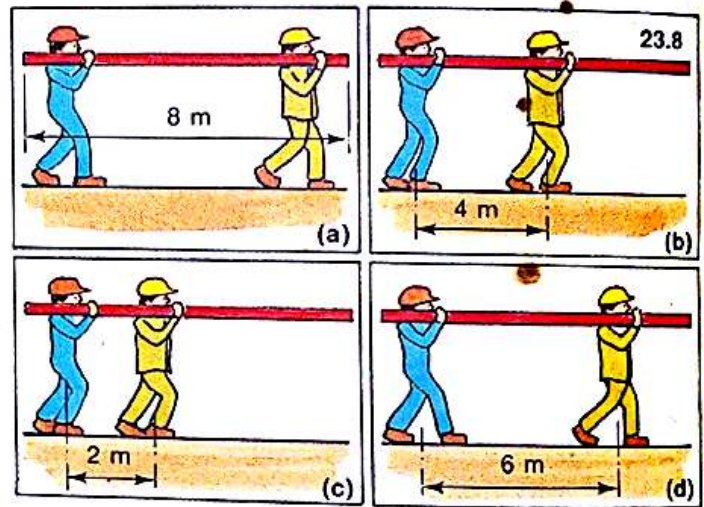
- Faire le bilan des forces appliquées à la barre.
- En appliquant le théorème des moments à la barre, par rapport à un axe imaginaire Δ passant par A, déterminer la tension du fil CC'.
- Calculer de la même façon la tension du fil AA', en appliquant le théorème des moments par rapport à un axe imaginaire passant par C.

4/ Vérifier que la somme des forces appliquées à la barre est nulle.



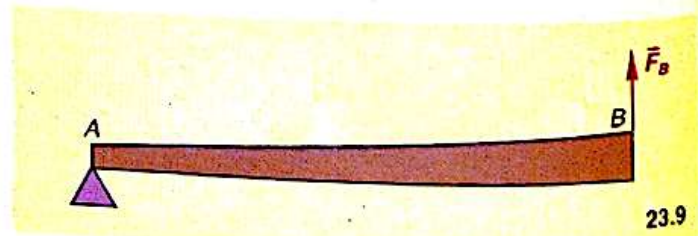
23.7

23.8 Deux personnes portent une poutre de 8 m de longueur, de section 130 cm^2 , de masse volumique 500 kg.m^{-3} . La poutre étant en équilibre, ces personnes exercent des forces verticales. Déterminer ces forces dans chaque cas. On prendra $g = 10 \text{ N.kg}^{-1}$.



23.8

23.9 La poutre AB ci-après, de longueur $2,4 \text{ m}$ est en partie tronconique. On veut déterminer son centre d'inertie par la méthode suivante. On place l'extrémité A sous un couteau horizontal. Pour que la poutre soit en équilibre, il faut exercer à son extrémité B une force verticale d'intensité 500 N . On intervertit A et B; la force à exercer en A vaut alors 100 N . En déduire le poids de la poutre et la position de son centre d'inertie.

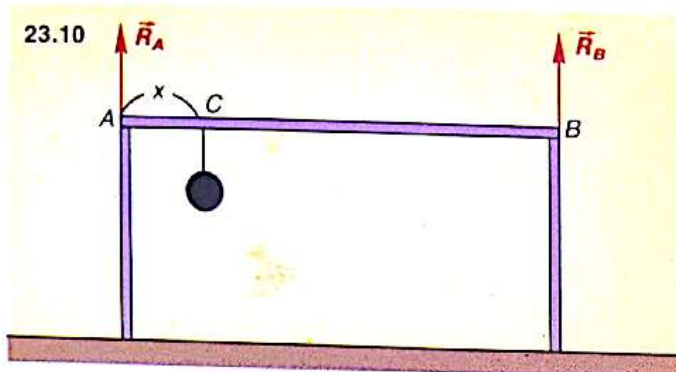


23.9

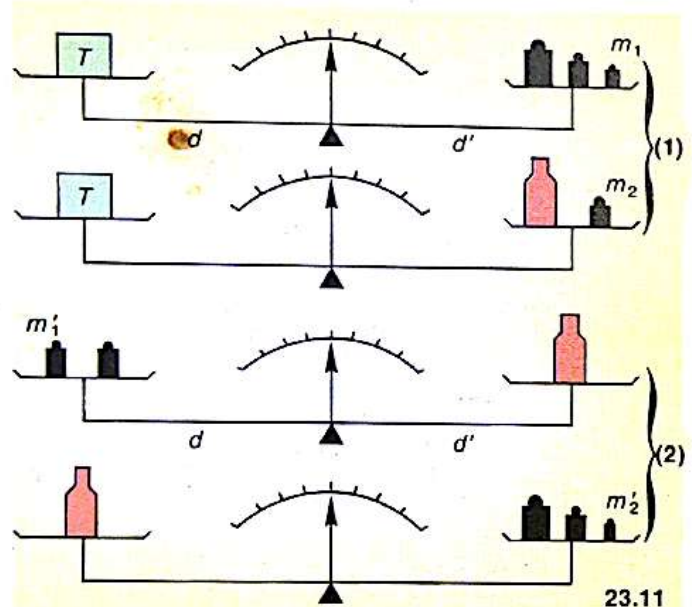
23.10 Une poutre homogène AB, de longueur 6 m et de masse 100 kg , repose, à ses extrémités, sur deux autres poutres verticales. On admettra que les réactions \vec{R}_A et \vec{R}_B de ces dernières sont verticales. En un point C situé à une distance x de A, on suspend une charge de 240 kg .

1/ Donner les expressions de $\|\vec{R}_A\|$ et $\|\vec{R}_B\|$ en fonction de x .

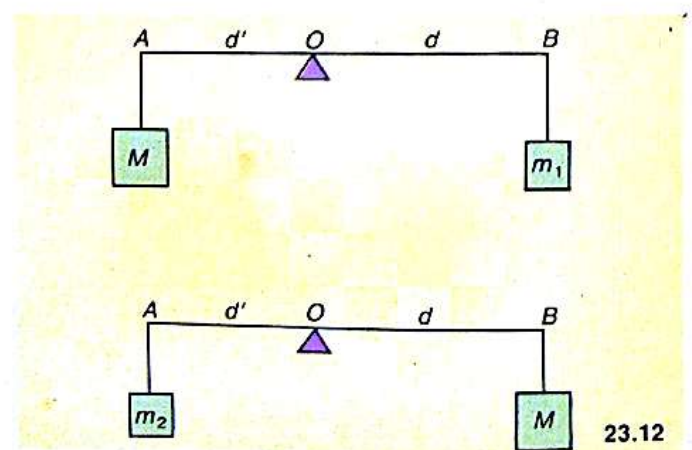
- 2/ Tracer $\|\vec{R}_A\| = f(x)$, $\|\vec{R}_B\| = g(x)$, $\|\vec{R}_A\| + \|\vec{R}_B\| = h(x)$.
 3/ En déduire $\|\vec{R}_A\|$ et $\|\vec{R}_B\|$ pour : $x = 1$ m; $x = 5$ m.
 Donnée : $g = 10$ N.kg⁻¹.



23.11 On peut comparer des masses avec une balance qui n'est pas juste (bras de fléau inégaux) en utilisant les doubles pesées de Borda (1) ou de Gauss (2).
 Montrer que la masse de la bouteille est égale à :
 $m = m_1 - m_2$ (Borda) ou : $m = \sqrt{m_1 \cdot m_2}$ (Gauss)



23.12 A l'aide d'une barre AB, de poids négligeable, on a réalisé les deux expériences schématisées sur la figure ci-après. A l'équilibre, la barre est horizontale.

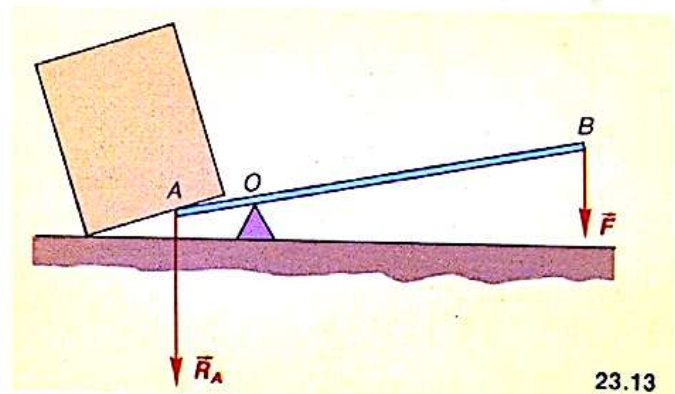


- 1/ Calculer la masse M en fonction de m_1 et m_2 .
 2/ On n'est pas certain que le couteau central d'une balance à deux plateaux, soit bien au milieu du fléau. En s'inspirant de ces expériences, peut-on donner une méthode de mesure d'une masse M qui s'affranchisse de cette incertitude.

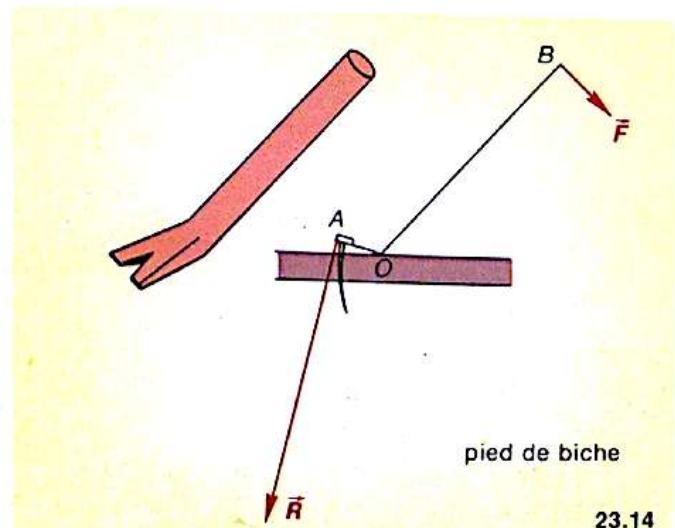
Principe du levier

23.13 Lorsqu'un carrier soulève une grosse pierre de taille, il prend une barre de fer très rigide appelée *pince de carrier*, glisse la partie biseautée A sous la pierre, passe sous la barre un point d'appui très solide O et appuie sur l'extrémité B. La barre AB et le point d'appui O constituent un levier. OA et OB s'appellent les bras de levier. On néglige le poids de la barre.

- 1/ On se place dans le cas particulier où l'action de la pierre \vec{R}_A sur la barre et celle du carrier \vec{F} sont parallèles. Montrer qu'à l'équilibre la réaction du point d'appui O sur la barre est parallèle à \vec{R}_A et \vec{F} .
 2/ En appliquant le théorème des moments à la barre, trouver la relation qui existe entre R_A , F , OA et OB. Mettre en évidence l'intérêt de ce dispositif.



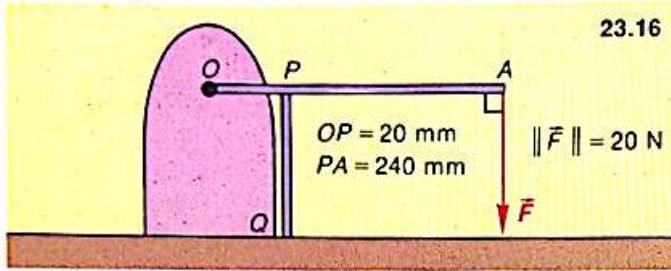
23.14 Le pied de biche est un levier coudé. On appuie sur son extrémité pour arracher un clou avec une force \vec{F} d'intensité égale à 200 N. Le pied de biche est long de $OB = 20$ cm. Le clou est pris dans la fourche à 2 cm du point d'appui.
 Quelle force le clou exerce-t-il sur le pied de biche à la limite de l'arrachage?



23.15 La manivelle d'un treuil a une longueur de 50 cm; l'arbre du treuil a 10 cm de diamètre. Quelle force faut-il exercer tangentiellment à la circonférence décrite par l'extrémité de la manivelle pour soulever deux sacs de ciment de 50 kg chacun? La réaction de l'axe du treuil varie-t-elle au cours du mouvement?

Données : $g = 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$.

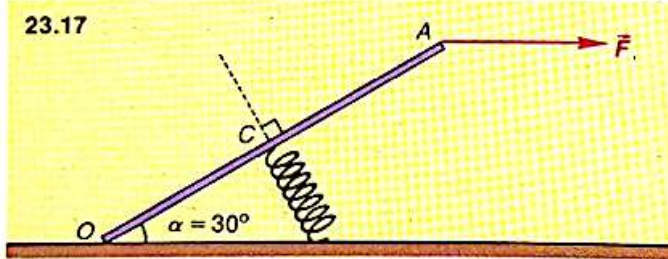
23.16 Une perforatrice de bureau est schématisée par la figure ci-après. L'articulation en O est sans frottement. On néglige les poids devant les forces mises en jeu. Déterminer la force qui s'exerce sur le poinçon PQ en P .



23.16

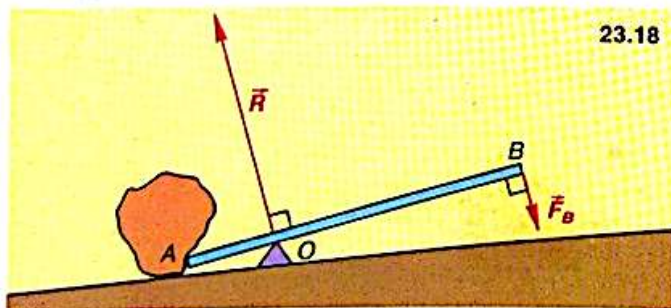
23.17 Une pédale OA de poids négligeable, de longueur 20 cm, est mobile autour d'un axe horizontal passant par O . On exerce en A une force \vec{F} horizontale d'intensité $\|\vec{F}\| = 20 \text{ N}$. La pédale est en équilibre quand le ressort, fixé en son milieu C , prend une direction perpendiculaire à OA ; OA fait alors un angle de 30° avec l'horizontale. Déterminer à l'équilibre :

- 1/ la force exercée par le ressort sur la pédale;
- 2/ la raideur k du ressort si on veut un raccourcissement de ce dernier de 8 cm.



23.17

23.18 On maintient soulevé un bloc de pierre à l'aide du levier schématisé sur la figure ci-après.

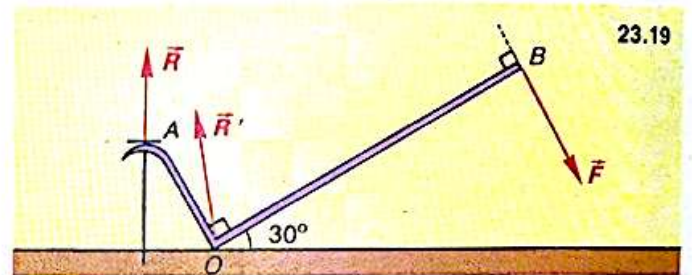


23.18

L'axe de rotation (axe d'appui) est tel que $OA = 10 \text{ cm}$ et $OB = 1 \text{ m}$. Le poids de la tige AB est négligeable devant les forces appliquées. On exerce en B une force \vec{F}_B perpendiculaire à la barre, de norme 500 N. On admet que la réaction de l'axe est équivalente à une force \vec{R} perpendiculaire à la barre. Quelle force \vec{F}_A le levier exerce-t-il sur le bloc à l'équilibre? Quelle est l'intensité de la réaction \vec{R} en O ?

23.19 Un levier *ped de biche* est coudé à 90° . Afin d'arracher un clou, on exerce en B une force perpendiculaire à OB d'intensité 200 N. En déduire la force \vec{R} , normale au plan, exercée par le levier sur le clou et la réaction \vec{R}' du sol en O (on négligera le poids du levier).

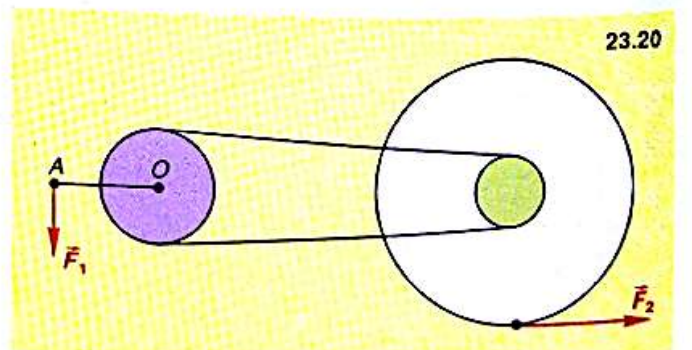
Données : $OB = 70 \text{ cm}$; $OA = 10 \text{ cm}$; angle de OB avec le plan : 30° .



23.19

La transmission de la bicyclette

23.20 On a schématisé sur la figure ci-après le système pédalier-chaîne-roue arrière d'une bicyclette. On exerce sur le pédalier une force de 250 N, orthogonale au bras de levier. La longueur de la manivelle OA est égale à 16 cm. Le pédalier a un diamètre de 20 cm. La roue arrière a un diamètre de 70 cm et le pignon arrière un diamètre de 10 cm. Calculer la force \vec{F}_2 qu'il faut appliquer tangentiellment à la roue pour la maintenir en équilibre.

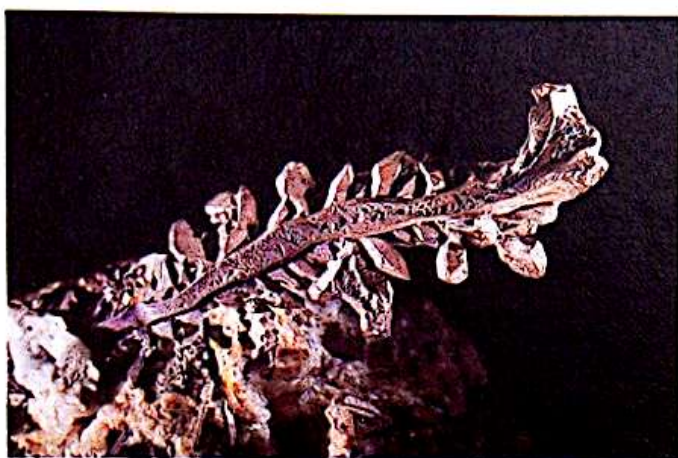


23.20

CHIMIE



Notion expérimentale d'élément chimique



1. Échantillon de cuivre natif.



2. Copeaux et poudre de cuivre.

24.1 le métal cuivre

Le cuivre, de couleur rouge, fut l'un des premiers métaux à être utilisé par l'homme car il se rencontrait à l'état natif. Actuellement, on l'extrait de divers minerais et sa production annuelle mondiale atteint 9 millions de tonnes.

C'est un très bon conducteur de la chaleur et de l'électricité; il est malléable et n'est pas attaqué en profondeur par l'air, même humide.

Au laboratoire, on le trouve sous forme de copeaux ou de poudre très fine.

24.2 transformations réciproques du métal cuivre et de l'ion cuivre

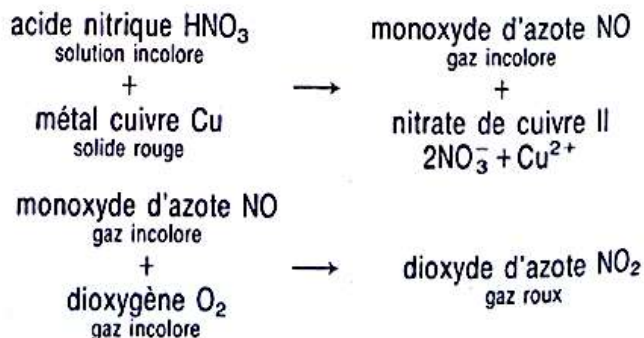
24.2.1 action de l'acide nitrique sur le métal cuivre

Faisons le bilan des transformations subies par le cuivre au cours des expériences décrites sur la fiche expérimentale 1 :

Le métal cuivre est formé d'atomes de cuivre constituant un ensemble compact. Sous l'action de l'acide nitrique, cet ensemble est détruit et les atomes de cuivre sont transformés en ions cuivre II. Ces ions se dispersent dans la solution qui contient alors des ions cuivre II Cu^{2+} et des ions nitrate NO_3^- : c'est une solution de nitrate de cuivre II. Ce sont les ions Cu^{2+} qui donnent à la solution sa coloration bleue.

Parallèlement, l'acide nitrique donne naissance à un gaz incolore, le monoxyde d'azote NO qui, au contact du dioxygène de l'air, se transforme en un gaz roux, le dioxyde d'azote NO_2 .

Résumons en indiquant les noms et les formules des réactifs et des produits :



Fiche expérimentale 1

action de l'acide nitrique sur le métal cuivre

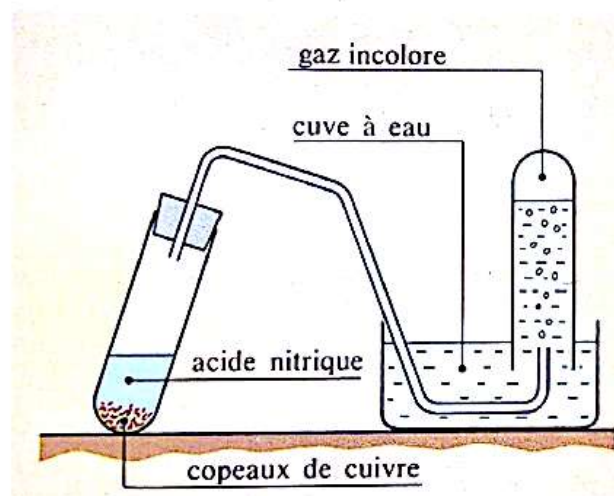
• Expérience 1

Dans un verre à pied, introduisons un copeau de tournure de cuivre et ajoutons une solution concentrée d'acide nitrique. Une réaction vive se produit : nous observons que la solution s'échauffe et prend une teinte bleue tandis que des vapeurs rousses se dégagent (*photo 3*). Ces vapeurs sont parfois appelées « vapeurs nitreuses » ou « vapeurs rutilantes ». Au bout de quelques instants, nous constatons la disparition totale du copeau de cuivre.

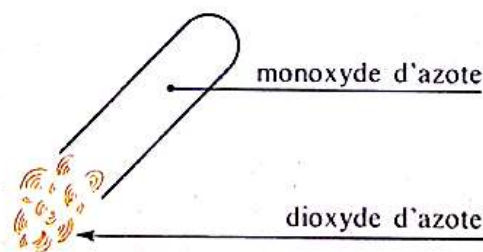
Reprenons l'expérience en utilisant le montage de la figure 4, montage qui permet de recueillir le gaz qui se dégage. Comme précédemment, nous observons la réaction de l'acide nitrique sur le cuivre, mais les vapeurs qui se forment dans le flacon sont de moins en moins colorées au fur et à mesure que le temps passe. Nous recueillons dans une éprouvette un gaz incolore. Retournons l'éprouvette dans l'air : des vapeurs rousses apparaissent immédiatement (*fig. 5*).



3. Action de l'acide nitrique sur le métal cuivre.



4. Obtention du monoxyde d'azote.



5. Formation du dioxyde d'azote.

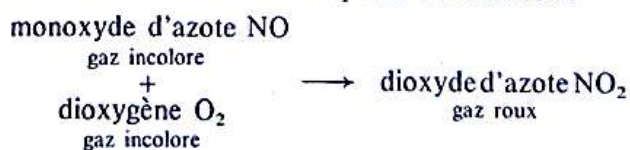
Interprétation

La première expérience montre que l'acide nitrique peut réagir sur le cuivre. La seconde expérience démontre que le gaz produit par cette réaction est incolore. C'est au contact de l'air que ce gaz incolore se transforme en un gaz roux, observé lors de la première expérience. Plus précisément, c'est en réagissant sur le dioxygène que contient l'air que le gaz incolore se change en gaz roux.

Le gaz incolore est du monoxyde d'azote.

Le gaz roux est du dioxyde d'azote.

La réaction chimique correspondante peut être décrite en nommant les espèces concernées :



Afin de compléter l'interprétation de la première expérience, il nous faut trouver ce qu'il est advenu du métal cuivre : s'est-il dissous dans la solution ? a-t-il subi une transformation chimique ?

• Expérience 2

Prélevons quelques cm^3 de la solution bleue et chauffons-la doucement : l'eau s'évapore petit à petit et nous obtenons un résidu solide formé de quelques cristaux bleus; leur aspect est très différent de celui du cuivre métal.

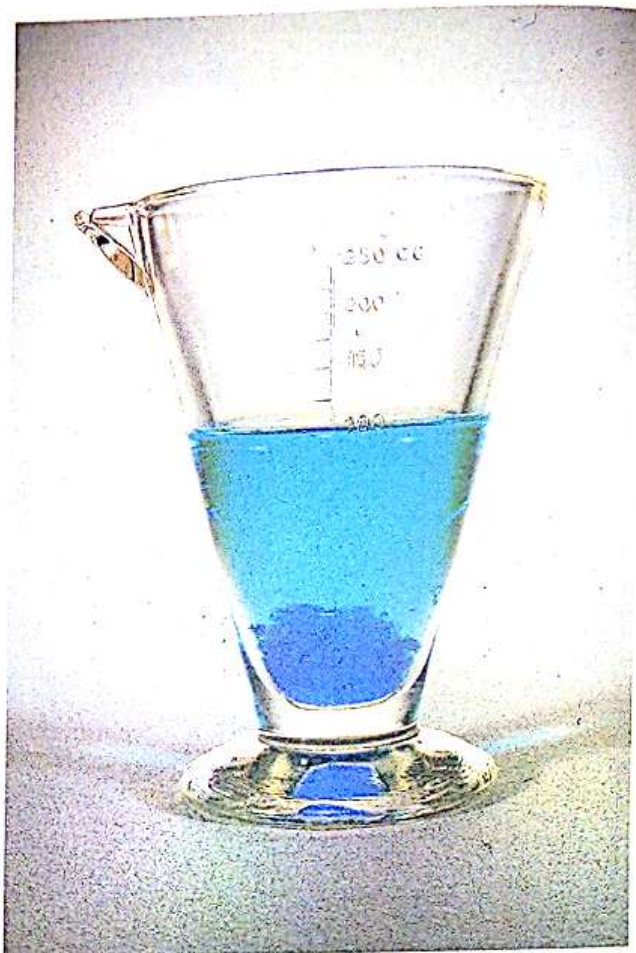
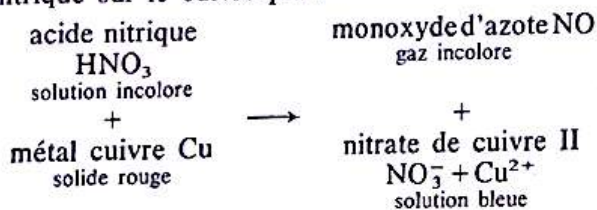
Ce nouveau corps est appelé nitrate de cuivre II. Dans une autre partie de la solution bleue, ajoutons quelques gouttes de solution de soude : un précipité gélatineux bleu apparaît immédiatement (fig. 6).

Interprétation

Nous savons que la coloration bleue de la solution est presque toujours le signe de la présence d'ions cuivre II. Afin de confirmer cette présence, nous avons effectué le test à la soude : le précipité bleu obtenu, de l'hydroxyde de cuivre II, confirme la présence d'ions cuivre II dans la solution.

Lors de l'évaporation de la solution bleue, les ions cuivre II se sont associés avec les ions nitrate provenant de l'acide nitrique pour donner les cristaux de nitrate de cuivre II.

Nous pouvons à présent résumer l'action de l'acide nitrique sur le cuivre par :

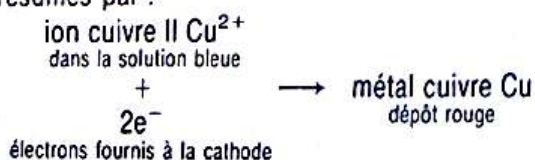


6. Le test à la soude donne un précipité bleu qui confirme la présence d'ions cuivre II dans la solution.

24.2.2 électrolyse d'une solution contenant des ions cuivre II

Une solution bleue de sulfate de cuivre II contient des ions sulfate SO_4^{2-} et cuivre II Cu^{2+} dispersés parmi les molécules d'eau : elle conduit donc le courant électrique. Lorsque le courant traverse la solution, les ions Cu^{2+} sont dirigés vers la cathode puis forcés d'accepter deux électrons; ils se transforment en atomes de cuivre qui s'assemblent pour donner le dépôt de cuivre métal.

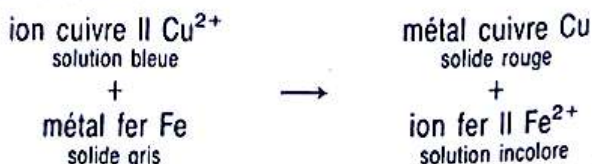
Les phénomènes se déroulant à la cathode peuvent donc être résumés par :



24.2.3 action du métal fer sur une solution d'ions cuivre II

Une plaque de fer plongée dans une solution bleue contenant des ions Cu^{2+} se couvre en quelques minutes d'un dépôt rouge de cuivre métal. Simultanément apparaissent en solution des ions fer II, Fe^{2+} .

Les ions Cu^{2+} , au contact des atomes de fer, gagnent deux électrons et se transforment en atomes de cuivre. Les atomes de fer, à qui ont été arrachés deux électrons, donnent naissance à des ions Fe^{2+} qui se dispersent dans la solution.

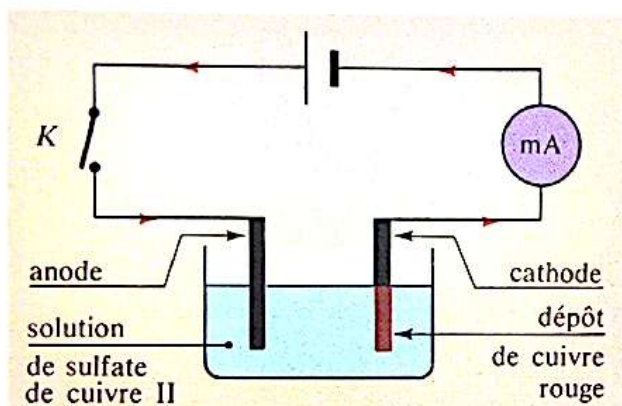


Fiche expérimentale 2

électrolyse d'une solution contenant des ions cuivre II

Dans un bécher, versons une solution de sulfate de cuivre II ou de nitrate de cuivre II : ces deux solutions contiennent des ions cuivre II comme en témoigne leur coloration bleue.

Plongeons dans la solution deux électrodes de graphite que nous relierons aux bornes d'une batterie d'accumulateurs. Le courant pénètre dans la solution par l'électrode reliée à la borne positive du générateur : cette électrode est par définition l'anode. Le courant ressort par l'autre électrode,

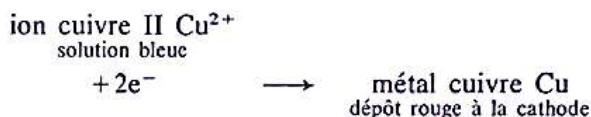


la cathode, qui est reliée à la borne négative (fig. 7).

Lorsque le courant a traversé la solution pendant quelques minutes, nous observons l'apparition sur la cathode d'un dépôt rougeâtre. Interrompons le passage du courant; un grattage de la cathode permet de recueillir quelques fragments de ce dépôt. Traités par une solution d'acide nitrique, ils donnent une coloration bleue à la solution et un dégagement de vapeurs rousses.

Interprétation

L'aspect du dépôt obtenu à la cathode ainsi que l'action de l'acide nitrique ne laissent aucun doute : du cuivre métal est apparu à la cathode. Au contact de la cathode, les ions Cu^{2+} sont obligés de capter chacun deux électrons apportés par le courant électrique; ils se transforment ainsi en atomes de cuivre selon :



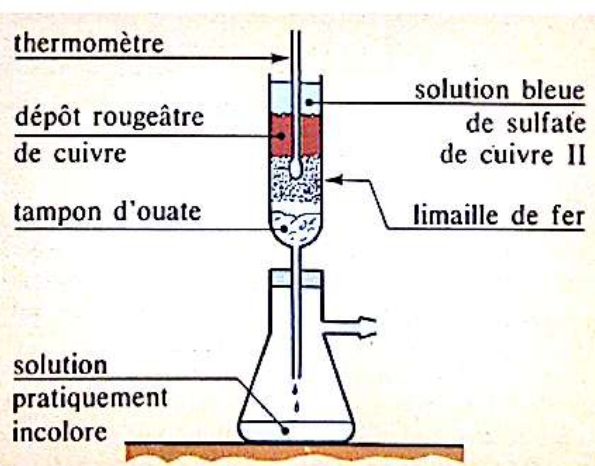
Remarque : D'autres transformations ont lieu simultanément à l'anode.

action du métal fer sur une solution contenant des ions cuivre II

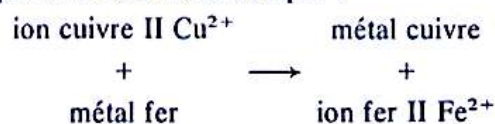
Dans une solution de sulfate de cuivre II, plongeons une lame de fer. Au bout de quelques minutes, observons la lame : son aspect semble le même, mais dès que nous la sortons de la solution, nous remarquons un dépôt rougeâtre sur la partie de la lame qui était immergée. Nous pouvons recueillir ce dépôt et vérifier, grâce à la réaction sur l'acide nitrique, qu'il s'agit bien de cuivre métallique : au contact de la plaque de fer, les ions cuivre II se sont transformés en cuivre métal. Quel est le rôle de la plaque de fer? Sert-elle uniquement de support au dépôt de cuivre?

Pour répondre à ces questions, réalisons une deuxième expérience. Au-dessus d'un tampon d'ouate, plaçons une couche de limaille de fer puis versons doucement une solution de sulfate de cuivre II. Nous observons qu'un dépôt rouge de cuivre appar it au sommet de la couche de limaille, tandis que la solution que l'on recueille après traversée de la limaille et du tampon est pratiquement incolore (fig. 8).

Ajoutons à cette solution incolore quelques cm^3 d'eau de Javel : un précipité rouille appar it aussitôt. La solution obtenue contient donc des ions fer II.



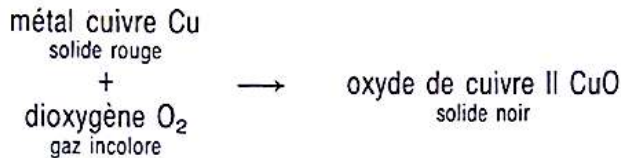
Les transformations chimiques concernant le cuivre peuvent être résumées par :



24.3 transformations réciproques du métal cuivre et de l'oxyde de cuivre

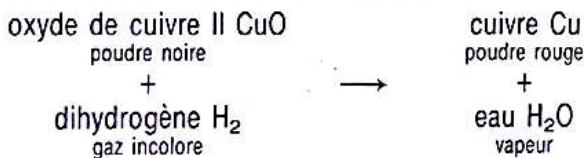
24.3.1 oxydation du métal cuivre

Plaçons un morceau de tournure de cuivre dans la flamme d'un bec Bunsen : la flamme se colore fugitivement en vert tandis que la plaque de cuivre se couvre d'une couche noire : à la température de la flamme, le cuivre métal réagit sur le dioxygène de l'air pour donner de l'oxyde de cuivre II, noir. La réaction peut être résumée par :



24.3.2 action du dihydrogène sur l'oxyde de cuivre

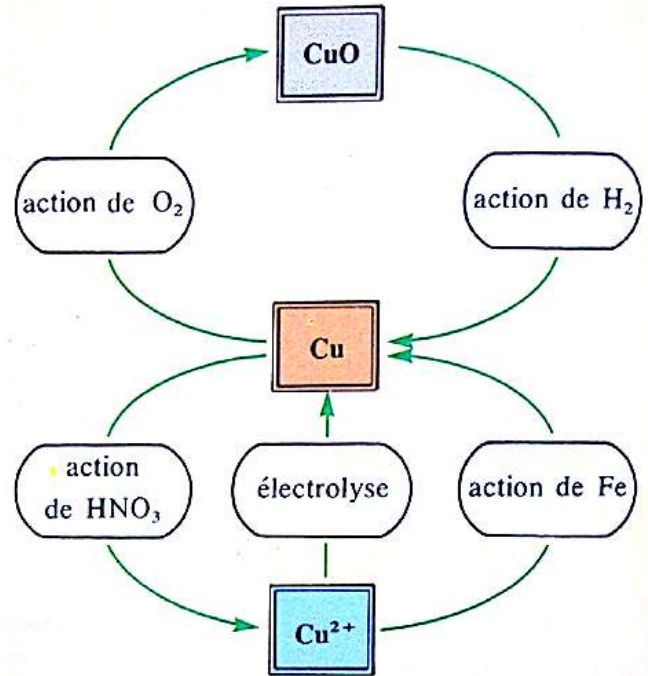
Les expériences décrites sur la fiche expérimentale 3 montrent qu'à chaud l'oxyde de cuivre réagit sur le dihydrogène pour donner du cuivre métal et de la vapeur d'eau. La réaction peut être traduite par :



24.4 élément cuivre

24.4.1 définition

L'ensemble des expériences effectuées sur le métal cuivre et ses composés est rappelé sur le diagramme de la figure 9.



9. Diagramme des différentes transformations effectuées sur l'élément cuivre.

Fiche expérimentale 3

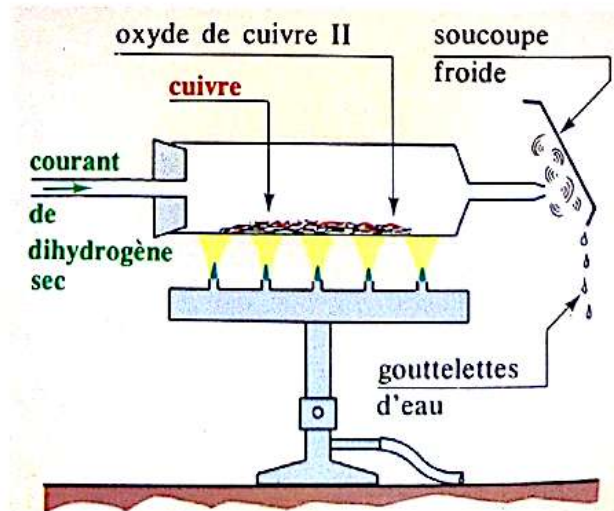
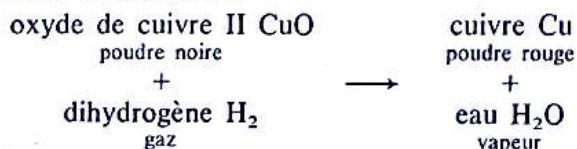
action du dihydrogène sur l'oxyde de cuivre II

Dans un tube de verre horizontal, disposons une couche d'oxyde de cuivre II, noir. Relions ce tube à un appareil de Kipp qui produit du dihydrogène et purgeons le tube de l'air qu'il contient en faisant circuler un courant de dihydrogène.

Allumons alors un bec de gaz permettant de chauffer le tube (fig. 10). Nous observons l'apparition progressive d'un solide rouge dans la zone chauffée, tandis que des gouttelettes d'eau se condensent à la sortie du tube.

Interprétation

L'oxyde de cuivre II a été transformé en cuivre métal tandis que le dihydrogène donnait de la vapeur d'eau selon :



10. Mise en évidence de l'action du dihydrogène sur l'oxyde de cuivre II.

Au cours des diverses réactions chimiques, la nature profonde, l'«essence» du cuivre, est demeurée inchangée : ce qu'une transformation chimique a fait (passer du cuivre à l'oxyde de cuivre par exemple), une autre, bien choisie, peut le défaire (l'action du dihydrogène sur l'oxyde de cuivre, par exemple, régénère le cuivre).

L'élément cuivre est ce qui est commun au métal cuivre et à tous ses composés, en dépit de la diversité de leurs apparences : il est présent dans le métal rouge comme dans la solution bleue du nitrate de cuivre II ou dans la poudre noire de l'oxyde de cuivre. Cette permanence se concrétise par la présence de particules, les atomes de cuivre qui, plus ou moins modifiés, se retrouvent dans

le métal et dans tous ses composés.

Au cours des différentes réactions chimiques, les atomes de l'élément cuivre se sont conservés.

24.4.2 corps simple et corps composé

Le métal cuivre Cu, dans lequel ne se rencontrent que des atomes de l'élément cuivre, est appelé **corps simple**.

Par opposition, l'oxyde de cuivre II CuO, constitué par un assemblage d'atomes de cuivre et d'oxygène, est appelé **corps composé**.

L'élément cuivre est donc commun au corps simple métal cuivre et à tous ses composés : oxyde de cuivre, sulfate de cuivre, nitrate de cuivre...

24.5 éléments chimiques

24.5.1 définition

Par analogie avec l'exemple du cuivre, nous dirons que :

- Un corps simple ne contient qu'un seul type d'atomes.
- Un corps composé contient plusieurs types d'atomes.
- Un élément est ce qui est commun à un corps simple et à tous ses composés.

Exemples :

L'élément azote est ce qui est commun au diazote N₂ (présent dans l'air), au monoxyde d'azote NO (produit par action de l'acide nitrique sur le cuivre), au dioxyde d'azote NO₂ (vapeurs rousses).

L'élément oxygène est présent dans le dioxygène de l'air O₂, dans l'eau H₂O, dans l'oxyde de cuivre CuO et dans les oxydes (mono- et di-) de l'azote NO et NO₂.

24.5.2 principe de conservation

A chaque élément correspond un type d'atomes qui se retrouvent, avec des modifications superficielles, dans tous les corps chimiques contenant l'élément. Comme pour les atomes de l'élément cuivre, nous pouvons affirmer :

- Au cours des réactions chimiques, les atomes des différents éléments se conservent.

24.5.3 symbole des éléments

On connaît actuellement 109 éléments chimiques : 90 se rencontrent à l'état naturel, les autres ont été préparés dans les laboratoires de physique nucléaire.

Chaque élément(*) possède un nom et un symbole : ce symbole est toujours une lettre majuscule, le plus souvent la première lettre de son nom français ou latin.

Exemples :

H pour hydrogène; O pour oxygène; C pour carbone.

nom de l'élément	symbole	nom de l'élément	symbole
Aluminium	Al	Hydrogène	H
Argent	Ag	Magnésium	Mg
Argon	Ar	Mercure	
Azote (Nitrogène)	N	(Hydrargyrum)	Hg
Baryum	Ba	Nickel	Ni
Brome	Br	Or (Aurum)	Au
Calcium	Ca	Oxygène	O
Carbone	C	Phosphore	P
Chlore	Cl	Plomb	Pb
Cuivre	Cu	Potassium (Kalium)	K
Fer	Fe	Silicium	Si
Fluor	F	Sodium (Natrium)	Na
Hélium	He	Soufre	S
		Zinc	Zn

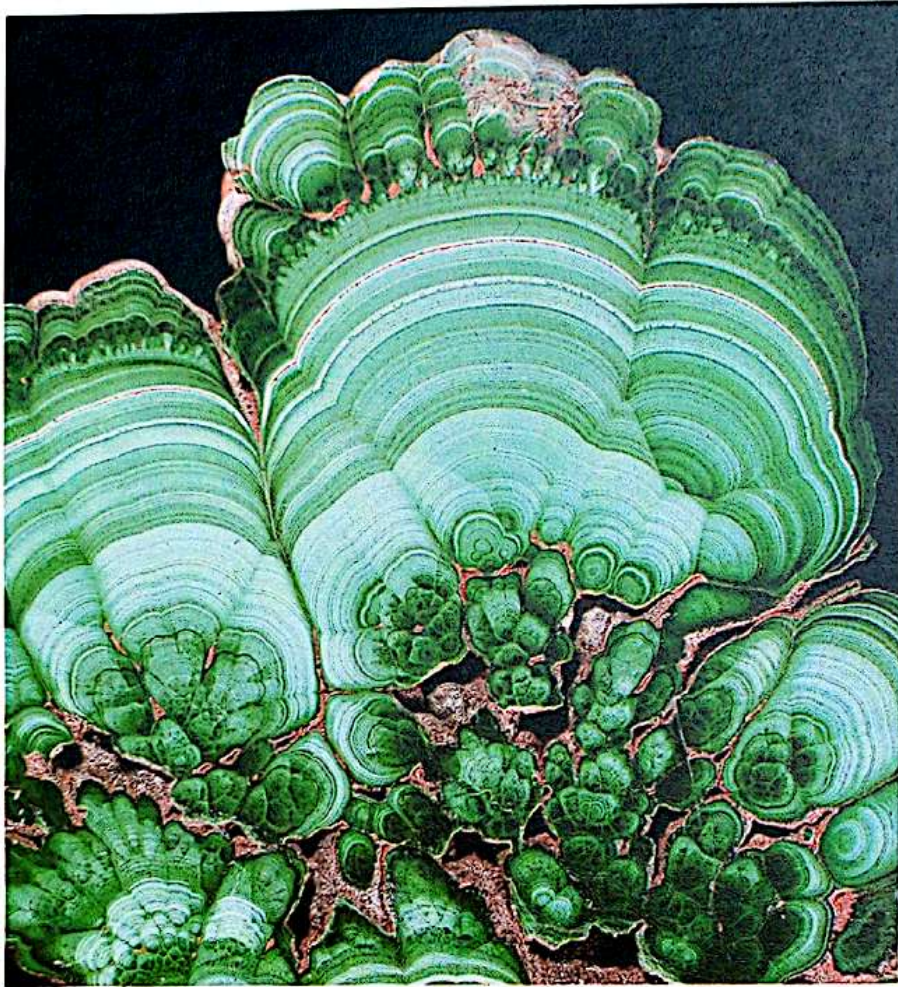
11. Symboles des éléments usuels.

Lorsque les noms de plusieurs éléments commencent par la même lettre, on ajoute, pour différencier leurs symboles, une lettre minuscule à la majuscule.

Exemples :

C carbone; Cl chlore; Co cobalt; Ca calcium.

(*) Les derniers éléments fabriqués n'ont pas encore reçu de nom.



◀ Malachite.



◀ Azurite.

L'élément cuivre se retrouve dans ces deux minéraux, malgré leur grande différence d'aspect.

Faire le point

- Que signifie « à l'état natif »? Connaissez-vous d'autres éléments qui existent à l'état natif?
- Que signifie « malléable »?
- Quelle est la couleur d'une solution contenant des ions cuivre II? Quel test peut-on effectuer pour vérifier la présence d'ions cuivre dans une solution?
- Quels sont les éléments communs au dioxyde d'azote et au monoxyde d'azote? En quoi diffèrent ces deux corps?
- Comment s'appelle l'électrode reliée au pôle positif du générateur, lors d'une électrolyse? Dans quel sens circule le courant à l'intérieur de la solution?
- Quelle est la propriété des atomes des éléments au cours d'une réaction chimique?
- Combien d'éléments comporte l'oxyde de cuivre? le dioxyde d'azote? le dihydrogène?
- Définir les termes « corps simple » et « corps composé ».
- Combien connaît-on actuellement d'éléments chimiques? Combien sont naturels?
- L'eau peut être décomposée en dioxygène et dihydrogène. Est-ce un corps simple ou un corps composé?

24.1 La moitié de la production mondiale de cuivre est utilisée dans l'industrie électrique. Quelle est celle de ses propriétés qui explique ce fait? Si on suppose que le cuivre est débité sous forme de fil cylindrique de 5 mm de diamètre, quelle est la longueur du fil utilisée par l'industrie électrique?

Donnée : la masse volumique du métal cuivre est de $8,96 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

24.2 En brûlant dans l'air, le bois, le charbon, le gaz, le pétrole, les bougies produisent un gaz : le dioxyde de carbone. Quel est l'élément commun à toutes ces substances?

24.3 Un morceau de sucre fortement chauffé subit une réaction appelée « pyrolyse ». Que signifie ce terme? Les produits de la réaction sont du « charbon de sucre » et de la vapeur d'eau. Quels sont les éléments présents dans le sucre?

24.4 L'aimant attire le fer. Les épinards contiennent du fer. Donc l'aimant attire les épinards! Faire l'expérience, si besoin est, puis rectifier les différentes propositions en précisant le sens du mot « fer » dans chacune d'elles.

24.5 Parmi les symboles des éléments suivants, déterminer ceux qui sont incorrects :

P; PB; Ar; N; na; CO; hG.

Rectifier et nommer les éléments correspondants.

24.6 En utilisant les préfixes appropriés (mono \leftrightarrow 1, di \leftrightarrow 2, tri \leftrightarrow 3, etc.), donner le nom des corps suivants :

NO; SO₂; CO; O₃; SO₃; CO₂.

24.7 Écrire les formules des corps suivants et préciser si ce sont des corps simples ou des corps composés :

difluor; chlorure de sodium; bromure d'hydrogène; octasoufre; trioxygène.

24.8 Certains disent : « Le fluor est extrêmement dangereux : il réagit sur l'eau de manière brutale. » D'autres affirment : « Le fluor est nécessaire pour lutter contre les caries dentaires; dans certains pays, on ajoute du fluor dans l'eau potable. » Montrer qu'il est possible de les mettre d'accord en utilisant un vocabulaire plus précis.

Structure de l'atome

25.1 les atomes

25.1.1 existence des atomes

Pour interpréter les résultats expérimentaux concernant les propriétés physiques et chimiques des différentes substances, les chimistes du XIX^e siècle ont été conduits à postuler l'existence d'atomes. D'abord considérée comme une hypothèse de travail (Dalton, 1808), cette existence a été par la suite largement démontrée, et nous admettons maintenant la réalité atomique.

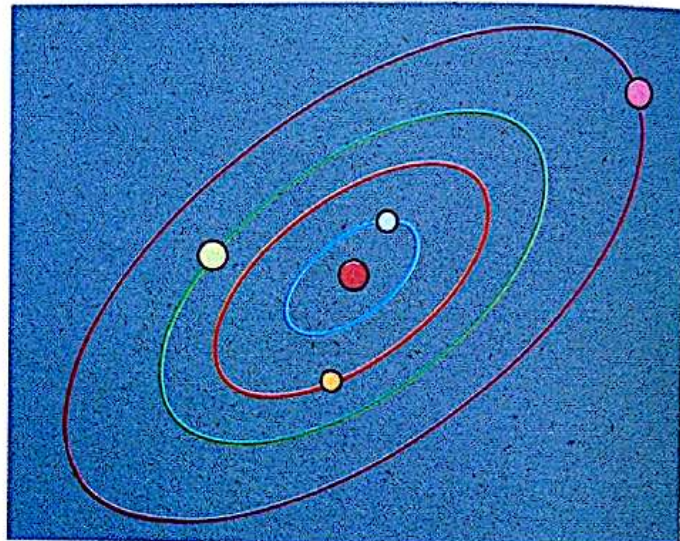
- Toute substance, vivante ou inerte, est formée à partir de particules très petites : les atomes.

25.1.2 les étapes de la connaissance de l'atome

Une fois admise l'hypothèse atomiste de Dalton — trois quarts de siècle ont été nécessaires pour que la communauté scientifique l'accepte —, on chercha à préciser la structure de l'atome. Le modèle de Dalton représentant l'atome comme une particule insécable (c'est l'étymologie du mot atome) dut être abandonné vers la fin du XIX^e siècle : la découverte, par Crookes, en 1878, des rayons cathodiques, puis celle de l'émission de charges électriques négatives par les métaux chauffés montrèrent que l'atome pouvait émettre des corpuscules électrisés chargés négativement que nous appelons aujourd'hui *électrons*.

Au début du XX^e siècle, Jean Perrin, puis Sir Ernest Rutherford, proposèrent un modèle *planétaire* d'atome : des électrons gravitent autour d'un noyau chargé positivement, comme les planètes gravitent autour du Soleil (*fig. 1*). Ce modèle, amélioré en 1913 par Niels Bohr et appelé *atome de Bohr*, connut un grand succès ; il permettait en effet de rendre compte quantitativement d'un grand nombre de faits expérimentaux concernant l'atome d'hydrogène. Cependant il se révéla insuffisant pour interpréter les propriétés des autres atomes.

Il fallut attendre l'apparition, en 1924, de la Mécanique ondulatoire (ou Mécanique quantique) de Louis de Broglie — complétée par les travaux de Schrödinger, Heisenberg et Pauli — pour disposer d'une théorie cohérente permettant l'étude des systèmes atomiques et moléculaires.



1. Un système planétaire, tel notre système solaire, est constitué d'une étoile centrale autour de laquelle gravitent des planètes, le long de trajectoires bien déterminées. Un tel modèle, appliqué à l'atome, s'est vite avéré inexact et insuffisant.

25.2 l'atome d'hydrogène

Commençons par étudier la constitution d'un atome isolé. Pour cela, choisissons l'atome le plus simple : l'atome d'hydrogène.

25.2.1 constitution

L'atome d'hydrogène est formé d'un noyau chargé d'électricité positive et d'un électron. Le noyau de l'atome d'hydrogène, identifié pour la première fois par Rutherford en 1910, est un des constituants des noyaux des autres atomes. Cette particule est appelée *proton*. Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques comparées de l'électron et du proton.

	masse (kg)	charge (C)	rayon (m)
proton	$1,6726 \cdot 10^{-27}$	$+1,6022 \cdot 10^{-19}$	$1,2 \cdot 10^{-15}$
électron	$9,1095 \cdot 10^{-31}$	$-1,6022 \cdot 10^{-19}$	$2,8 \cdot 10^{-15}$

Comparaison des caractéristiques du proton et de l'électron.

Nous notons deux faits fondamentaux :

- La charge du proton est exactement opposée à celle de l'électron : la charge globale de l'atome d'hydrogène est donc nulle.
- La masse du proton est environ 1836 fois celle de l'électron : la masse de l'atome d'hydrogène est ainsi pratiquement égale à celle de son noyau.

25.2.2 mouvement de l'électron autour du noyau

L'électron de l'atome d'hydrogène est en mouvement incessant autour du noyau chargé positivement. Mais à la question : quelle est sa trajectoire? la Mécanique quantique nous dit qu'il ne nous est pas possible de répondre!

La notion de trajectoire n'a plus de sens pour un électron à l'intérieur d'un atome. Tout ce que nous pouvons connaître de l'électron dans l'atome d'hydrogène est la probabilité de le trouver au voisinage d'un point.

Précisons cette notion par une analogie : de même qu'un joueur de dés ne peut pas prévoir avec certitude le résultat d'un lancer, de même on ne peut pas affirmer qu'on rencontrera l'électron en un point donné. Mais, de même que le lanceur de dés peut affirmer que la probabilité de tirer un 2 est de $1/6$ (1 chance sur 6), par exemple, de même le chimiste quantique peut calculer la probabilité de trouver l'électron au voisinage du point choisi.

Précisons comment varie cette « probabilité de présence » dans l'atome d'hydrogène. Pour un atome isolé, c'est-à-dire sans interaction avec d'autres atomes, toutes les directions de l'espace sont équivalentes. La probabilité de présence ne dépend donc que de la distance r de l'électron au noyau.

La probabilité de présence de l'électron ne s'annule que lorsque la distance au noyau tend vers l'infini. Le « nuage électronique » n'a donc pas de limite précise et on ne peut assimiler l'atome d'hydrogène isolé à une sphère rigide de rayon déterminé. Par contre, on peut calculer la probabilité de trouver l'électron à l'intérieur d'une sphère de rayon donnée : ainsi, la probabilité de trouver l'électron à l'intérieur d'une sphère de rayon $r = 2,97 \cdot 10^{-10}$ m est de 0,999; on a seulement 1 chance sur 1000 de le rencontrer à l'extérieur de cette sphère!

25.2.3 caractère lacunaire

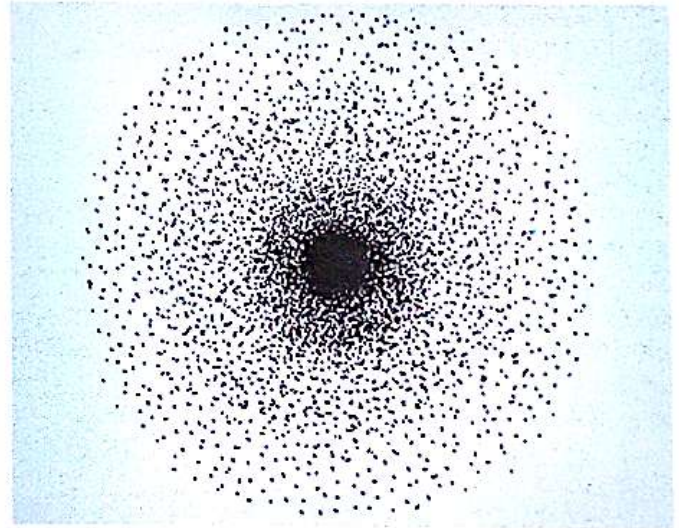
Comparons l'ordre de grandeur des distances rencontrées lors de l'étude de l'atome d'hydrogène :

- L'électron et le proton, assimilés à des sphères, ont des rayons de l'ordre de 10^{-15} m.
- La région dans laquelle l'électron se déplace est une sphère d'environ $5 \cdot 10^{-11}$ m de rayon, donc 10 000 fois plus grand que les précédents!

Entre l'électron et le proton, il n'y a que le vide. On dit pour cela que l'atome d'hydrogène a une structure lacunaire.



2. Niels Bohr (1885-1962). Ce physicien danois perfectionna, en 1913, le modèle planétaire proposé par Rutherford puis participa activement au développement de la mécanique quantique. Son influence reste très grande, notamment en ce qui concerne les interprétations philosophiques des nouveaux concepts introduits par la mécanique quantique. Prix Nobel de Physique en 1922.



3. Nuage électronique de l'atome d'hydrogène.

Remarque : Les distances qui interviennent dans l'étude des atomes sont très petites, et il est commode d'utiliser des sous-multiples du mètre pour les mesurer :

- le picomètre (symbole : pm) qui vaut 10^{-12} m;
- le nanomètre (symbole : nm) qui vaut 10^{-9} m.

Pendant longtemps, on a utilisé également l'angström (symbole : Å) qui vaut 10^{-10} m soit 100 pm ou encore 0,1 nm.

25.3 structure des autres atomes

Dans chaque atome, comme dans l'atome d'hydrogène, nous trouvons deux parties : un noyau chargé positivement et des électrons en mouvement dans le vide autour de lui, l'ensemble étant électriquement neutre.

25.3.1 les constituants du noyau : les nucléons

Certains noyaux d'atomes ne sont pas très stables; ils explosent spontanément: c'est le phénomène de «radioactivité naturelle», découvert par Becquerel en 1896. Ce phénomène montre que, pas plus que l'atome, le noyau n'est insécable. On peut aussi provoquer l'éclatement de certains noyaux en les bombardant avec des particules qui possèdent de très grandes vitesses. Toutes ces expériences ont démontré que les noyaux sont constitués par l'assemblage de particules, les nucléons, qui sont de deux sortes :

- les protons;
- les neutrons qui, comme leur nom l'indique, ne portent pas de charges électriques. Leur masse est très légèrement supérieure à celle du proton : $1,67496 \cdot 10^{-27}$ kg. Retenons seulement que :

$$m_p \approx m_n \approx 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg.}$$

25.3.2 nucléides

Par définition :

- Le numéro atomique Z d'un noyau est le nombre de protons que contient ce noyau. Son nombre de masse A est le nombre de nucléons qu'il comporte. A et Z sont donc deux nombres entiers.

Les deux nombres A et Z suffisent à caractériser parfaitement un noyau : un noyau décrit par le couple (Z, A) comporte Z protons et porte donc la charge électrique $+Z \cdot e$; son nombre de neutrons est donné par la différence $(A - Z)$.

L'ensemble des atomes dont le noyau possède le même couple (Z, A) est appelé un nucléide.

L'Univers, ou du moins ce que nous en connaissons, contient environ 10^{78} noyaux, répartis entre quelques 300 nucléides. Plus d'un millier d'autres nucléides ont été préparés dans les laboratoires de physique nucléaire.

Remarque : Z est aussi appelé « nombre de charge » du noyau.

25.3.3 les électrons

Soit un atome de numéro atomique Z : son noyau comporte Z protons; la neutralité électrique de l'atome impose la présence de Z électrons qui constituent un nuage électronique autour du noyau.

Nous préciserons, dans le chapitre suivant, la structure de ce nuage, ou cortège électronique.



4. Nébuleuse de la Rosette. L'Univers, dans lequel on trouve des milliards de nébuleuses semblables, contient quelque 10^{78} noyaux.

25.3.4 masse des atomes

Considérons un atome dont le noyau est caractérisé par le couple (Z, A) : le noyau, formé de Z protons et de $(A - Z)$ neutrons, est entouré par Z électrons. Les masses du neutron et du proton étant très supérieures à celles de l'électron, la masse de l'atome est très voisine de celle du noyau.

Les masses des atomes restent évidemment très petites : elles sont de l'ordre de 10^{-26} kg. Ainsi la masse d'un atome d'hydrogène ($Z=1, A=1$) est de $0,16 \cdot 10^{-26}$ kg et celle d'un atome de fer ($Z=26, A=56$) de $9,33 \cdot 10^{-26}$ kg. Dans un échantillon de fer de 100 g, il y a donc environ 10^{24} atomes soit un million de milliards de milliards!

25.3.5 conclusion

Rassemblons les points essentiels dégagés dans l'étude précédente :

- L'atome est électriquement neutre.
- L'atome a une structure lacunaire.
- Le noyau est constitué de A nucléons : Z protons et $(A - Z)$ neutrons; il porte la charge électrique $+Z \cdot e$ ($e \approx +1,6 \cdot 10^{-19}$ C).
- Z électrons, portant chacun la charge $-e$, gravitent autour du noyau.
- La masse de l'atome est pratiquement égale à celle du noyau.

25.4 ions

25.4.1 obtention

Les expériences effectuées au chapitre 24 nous ont montré qu'en gagnant ou en perdant des électrons, les atomes se transforment en particules chargées (négativement ou positivement, selon le cas) appelées ions.

Ainsi sous l'action de l'acide nitrique HNO_3 , les atomes du métal cuivre perdent chacun deux électrons et se transforment en des entités qui portent deux charges élémentaires : les ions cuivre II Cu^{2+} .

De même, sous l'action des ions cuivre II Cu^{2+} , les atomes de fer perdent deux électrons pour donner naissance à des ions Fe^{2+} porteurs de deux charges élémentaires.

Les expériences d'électrolyse confirment également l'existence d'ions en solution.

Notons que quelles que soient les circonstances :

- La capture ou la perte d'un ou plusieurs électrons ne modifie pas le noyau d'un atome. Seul le cortège électronique est affecté.

25.4.2 ions et neutralité électrique

L'expérience nous enseigne, qu'à notre échelle, la matière est électriquement neutre. Donc dans un volume donné, les charges positives des ions positifs doivent compenser exactement les charges négatives des ions négatifs.

La neutralité électrique est vérifiée, que les ions soient en solution ou dans un cristal.

25.5 notion d'élément chimique

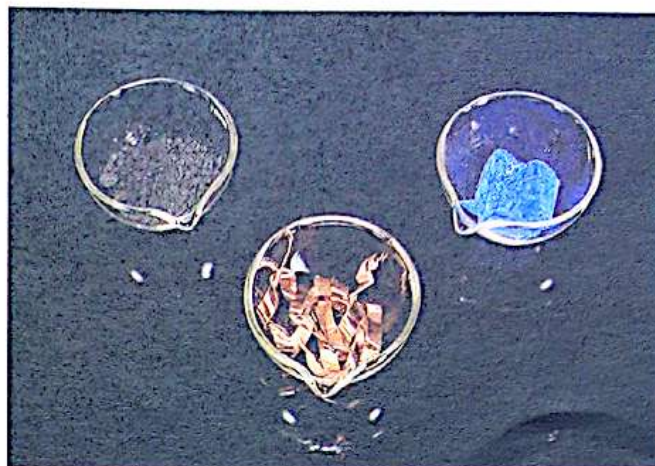
25.5.1 exemple de l'élément cuivre

La notion d'élément a été dégagée de manière expérimentale dans le chapitre précédent. Rappelons les conclusions que l'on peut tirer de diverses expériences effectuées sur le cuivre.

L'élément cuivre est ce qui est commun au métal cuivre et à tous ses composés, en dépit de la diversité de leurs apparences : l'élément cuivre est présent dans le métal rouge Cu comme dans les cristaux bleus de sulfate de cuivre II, $\text{SO}_4^{2-} + \text{Cu}^{2+}$, ou dans la poudre noire de l'oxyde de cuivre CuO (fig. 5).

La présence de l'élément cuivre dans tous ces corps peut être mise en évidence expérimentalement : tous émettent, lorsqu'ils sont portés dans la flamme chaude d'un bec Bunsen, la même lumière verte (fig. 6).

Tous contiennent donc des atomes, plus ou moins modifiés, de l'élément cuivre.



5. Diversité d'aspect de l'élément cuivre.



6. Mise en évidence de l'élément cuivre (test à la flamme).

Essayons de répondre à la question : qu'est-ce qui, dans un atome de cuivre ou un ion cuivre II, est caractéristique de l'élément cuivre? Son nombre d'électrons? Son nombre de neutrons? Son nombre de protons?

— Ce n'est pas le nombre d'électrons puisque l'atome de cuivre et l'ion cuivre II, qui a deux électrons de moins, sont des représentants de l'élément cuivre.

— Ce n'est pas le nombre de neutrons car tous les échantillons de cuivre contiennent plusieurs nucléides dont le nombre de neutrons varie de 34 à 36.

— Tous les représentants de l'élément cuivre ont par contre 29 protons dans leur noyau. Ils ont donc tous le même numéro atomique $Z=29$. Nous admettons que cette propriété est caractéristique.

On le voit, à un même élément peuvent correspondre plusieurs nucléides différents. C'est ce qui se produit dans la nature où l'on observe qu'à un même élément sont associés en général divers nucléides, cela dans des proportions déterminées qui restent pratiquement les mêmes lorsqu'on passe d'un échantillon à un autre.

Par exemple, l'élément azote à l'état naturel est formé par un mélange de deux nucléides dont les proportions sont les suivantes :

$$N(7,14) : 99,636 \% ; \quad N(7,15) : 0,364 \%$$

25.5.2 généralisation

- Un élément chimique est caractérisé par son numéro atomique Z .
- Tous les représentants (atomes ou ions) de cet élément ont un noyau comportant Z protons.
- Tous les atomes non ionisés de cet élément ont un même cortège électronique formé de Z électrons et des propriétés chimiques identiques.

C'est cette identité de propriétés chimiques qui fait la valeur de la notion d'élément pour le chimiste.

25.5.3 notation des atomes et des ions d'un élément

Un atome est parfaitement décrit par la donnée du couple (Z, A) : en effet, on sait alors que son noyau comporte Z protons et $(A-Z)$ neutrons et que son nuage électronique contient Z électrons.

Néanmoins, on utilise le plus souvent le symbole de l'élément en précisant le nombre de masse A en haut à gauche.

Exemple :

Soit l'atome caractérisé par $(12, 24)$. Le numéro atomique 12 correspond à l'élément magnésium dont le symbole est Mg. L'atome considéré est donc noté :



qui se lit « magnésium vingt-quatre ».

Application :

On considère les nucléides suivants désignés par (Z, A) : $(5, 11)$; $(11, 23)$; $(10, 20)$; $(10, 21)$; $(5, 10)$; $(10, 22)$.

Combien d'éléments chimiques sont représentés? Combien chacun d'eux a-t-il de représentants? Quel est leur nombre respectif de neutrons?

Parmi les six couples (Z, A) proposés, il n'y a que trois valeurs différentes de Z : 5, 10 et 11. Les six nucléides proposés correspondent donc à trois éléments chimiques seulement.

L'élément caractérisé par $Z=5$, le bore, a deux représentants dont les nombres de masse A sont respectivement 10 et 11. Leurs noyaux comportent $(A-Z)$ neutrons, soit 5 et 6 neutrons.

L'élément caractérisé par $Z=10$, le néon, a trois représentants dont les nombres de masse A sont respectivement 20, 21 et 22. Ils possèdent donc 10, 11 et 12 neutrons.

L'élément de numéro atomique $Z=11$, le sodium, a un seul représentant de nombre de masse $A=23$. Son noyau contient 12 neutrons.

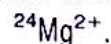
Dans le cas d'un ion, on précise sa charge en indiquant en haut à droite le nombre de charges élémentaires e qu'il porte.

Exemples :

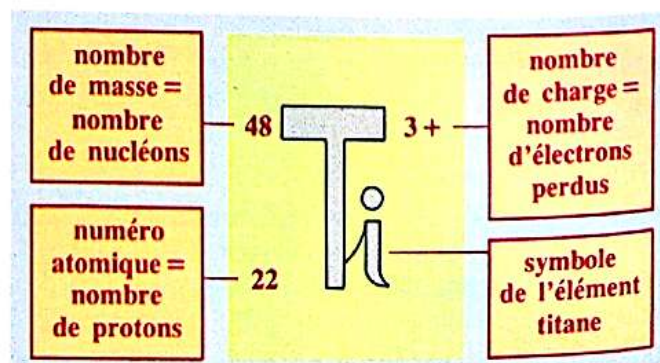
1/ L'atome de magnésium, au cours de certaines réactions chimiques, perd deux électrons et donne naissance à un ion portant une charge égale à $+2e$, l'ion magnésium II. Cet ion est noté :



Si l'on veut indiquer qu'il correspond à un atome de magnésium dont le nombre de masse est 24, on le note :



2/ L'atome de chlore a tendance, au cours des réactions chimiques, à capter un électron pour donner un ion porteur d'une charge $-e$, l'ion chlorure. On le note :



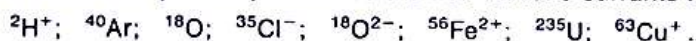
7. Exemple de notation atomique.

Faire le point

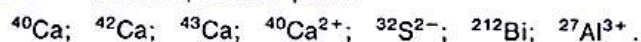
- Quelle est la structure de l'atome d'hydrogène?
- Que signifie « l'atome a une structure lacunaire »?
- Quelle est la définition d'un picomètre?
- Comparer les caractéristiques (charge, masse) de l'électron, du proton et du neutron.
- Définir le numéro atomique et le nombre de masse d'un atome.
- Comment est assurée la neutralité électrique d'un atome de numéro atomique Z ?
- Citer une réaction chimique où apparaissent des ions.
- Comparer la masse d'un atome et celle de l'ion obtenu en arrachant un électron.
- Quelle est la caractéristique d'un élément chimique?

Les numéros atomiques seront, si nécessaire, recherchés dans le tableau.

25.1 Indiquer le nombre de protons, de neutrons et d'électrons qui composent les atomes ou ions suivants :



25.2 Même question pour :



25.3 Compléter le tableau ci-dessous :

nom	symp.	charge globale	nombre de protons	nombre de neutrons	nombre d'électrons
			14	16	14
	${}^{18}\text{O}^{2-}$				
vanadium				28	
ion fluorure		$-e$		10	
			25	30	23
		$+3e$		30	23
ion cuivre II				35	

25.4 Certains noyaux radioactifs se désintègrent en émettant des particules α portant deux charges positives élémentaires. Leur nombre de masse est 4, leur numéro

atomique 2. Préciser les nombres d'électrons, de neutrons et de protons. A quel élément appartiennent les particules α ? Écrire le symbole complet correspondant aux particules α .

25.5 Déterminer la masse volumique du noyau d'hydrogène ${}^1\text{H}$ en supposant qu'il est assimilable à une sphère. Les données nécessaires sont dans le texte. A titre de comparaison, la masse volumique d'un des corps simples les plus denses, l'uranium, est de :

$$19 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}.$$

25.6 L'électron de l'atome d'hydrogène se déplace à l'intérieur d'une sphère de 300 pm de rayon (on a seulement 1 chance sur 1000 de le trouver à l'extérieur). Le noyau de l'atome est assimilable à une sphère de rayon $5 \cdot 10^{-15}$ m. Si le noyau est assimilé à une balle de tennis de 6 cm de diamètre, quel sera le rayon de la sphère où se déplace l'électron?

25.7 En physique nucléaire, on utilise souvent l'unité de masse atomique, notée u et définie comme le douzième de la masse de l'atome de carbone 12. La masse d'un proton est 1,007 276 u , celle d'un neutron de 1,008 665 u . Quelle devrait être la masse d'un noyau comportant six protons et six neutrons? Que remarquez-vous? L'écart constaté provient-il de la présence des électrons?

25.8 Soit un atome de ${}^{56}\text{Fe}$. Calculer la masse des électrons présents dans l'atome et la comparer à celle du noyau.

Quelle est la masse des électrons contenus dans 1 kg de fer?

Quelle est la masse de fer qui contient 1 kg d'électrons?

Donnée : la masse d'un atome de fer 56, exprimée en unités de masse atomique u (voir exercice 25.7), est de 55,935 u . $1 u = 1,660 55 \cdot 10^{-27}$ kg.

25.9 Peut-on confondre la masse d'un atome avec celle de son noyau?

Calculer pour les trois atomes suivants le rapport m_e/m_{at} de la masse des électrons à la masse de l'atome.

Quelle erreur relative commet-on en confondant la masse de l'atome et celle du noyau?

Données :

$$\text{masse d'un atome } {}^4\text{He} = 6,646 5 \cdot 10^{-27} \text{ kg};$$

$$\text{masse d'un atome } {}^{20}\text{Ne} = 33,198 4 \cdot 10^{-27} \text{ kg};$$

$$\text{masse d'un atome } {}^{238}\text{U} = 395,295 3 \cdot 10^{-27} \text{ kg}.$$

25.10 On considère les nucléides suivants caractérisés par le couple (Z, A) :

$$(9, 19); (26, 54); (12, 24); (24, 54); (12, 26); (26, 56).$$

Les répartir par éléments. Identifier les éléments concernés.

Structure électronique des atomes

Classification périodique des éléments

26.1 structure du cortège électronique

26.1.1 couches électroniques

Les Z électrons qui composent le nuage électronique d'un atome de numéro atomique Z sont en mouvement incessant et rapide. Ils restent néanmoins au voisinage du noyau car ils sont soumis à son attraction : le noyau qui porte la charge électrique $+Z \cdot e$ attire les électrons de charge $-e$.

Si l'on veut arracher un électron à l'atome, il faut lui fournir de l'énergie. L'expérience montre que les électrons d'un atome ne sont pas tous liés de la même manière au noyau : certains sont plus faciles à arracher que d'autres. On peut donc répartir les électrons d'un atome en plusieurs groupes, selon la facilité avec laquelle on peut les arracher à cet atome.

- Les électrons d'un atome se répartissent en « couches » encore appelées « niveaux ».
- Chaque couche est caractérisée par un nombre entier positif n , appelé « nombre quantique ».
- Les électrons sont d'autant plus liés au noyau que la couche à laquelle ils appartiennent a un nombre quantique plus petit.
- Pour les électrons d'une même couche, la zone de probabilité de présence maximale est à peu près la même; elle est située au voisinage d'une sphère dont le rayon r_{MAX} croît avec n et dépend de l'élément considéré.

Pour distinguer les couches (ou niveaux) de nombre quantique $n = 1, 2, 3, \dots$, on utilise souvent les lettres K, L, M, \dots prises dans le même ordre (fig. 1).

valeur du nombre quantique n	1	2	3	4	5
désignation de la couche	K	L	M	N	O

1. Notation d'une couche de nombre quantique n .



2. Wolfgang Pauli (1900-1958). Physicien suisse d'origine autrichienne, ses travaux théoriques sur la structure de l'atome et les particules ont été déterminants. Il énonça le fameux principe qui porte son nom en 1925. Prix Nobel de Physique en 1945.

26.1.2 structure électronique

Comment se répartissent sur les différentes couches successives les Z électrons d'un atome? Cette répartition obéit à deux règles :

1. La notion même de couches successives suppose qu'il y a, dans chaque couche, un nombre limité d'électrons. Cette limitation découle d'un principe fondamental, le Principe de Pauli.

• **Principe de Pauli** : Le nombre maximal d'électrons pouvant appartenir à une couche caractérisée par le nombre quantique n est $2n^2$.

Ainsi, la couche K , caractérisée par $n=1$, peut contenir 2 électrons au maximum, la couche L ($n=2$) peut en contenir 8, tandis que la couche M ($n=3$) sera saturée avec 18 électrons.

Le principe de Pauli ne peut être violé : il n'existe aucun atome, nulle part dans l'Univers, dont la structure électronique ne respecte pas ce principe.

2. Le Principe de Pauli fixe le nombre maximal d'électrons d'une couche, mais il n'indique pas dans quel ordre ces couches se remplissent. Une règle, appelée « règle de construction », indique l'ordre de remplissage des niveaux.

• **Règle de construction** : Les électrons occupent successivement les couches en commençant par celles ayant les nombres quantiques les plus faibles(*).

Des électrons occupent donc d'abord la couche K puis, quand celle-ci est saturée, d'autres se placent sur la couche L , etc.

L'état de l'atome obtenu en appliquant la règle de construction est l'état dans lequel il se trouve habituellement, c'est-à-dire sans intervention extérieure modifiant la répartition des électrons; on appelle cet état « état fondamental ».

26.1.3 formule électronique

Pour représenter la structure électronique d'un atome, on utilise couramment une formule électronique : on écrit pour cela la lettre, entre parenthèses, qui correspond à chaque couche et on indique en exposant, en haut à droite, le nombre d'électrons de cette couche, les couches vides n'étant pas spécifiées.

26.1.4 structure électronique des ions monoatomiques

La structure électronique des ions est, comme celle des atomes, déterminée par l'application du Principe de Pauli et de la Règle de construction.

Application 1 :

Établir les formules électroniques des atomes d'hydrogène, d'hélium et d'aluminium dans leur état fondamental.

On recherche d'abord, si besoin est, le numéro atomique des trois éléments dans le tableau correspondant :

$$H : Z = 1 ; \quad He : Z = 2 ; \quad Al : Z = 13.$$

1/ L'atome d'hydrogène a un proton dans son noyau; il possède donc un seul électron. A l'état fondamental, celui-ci se trouve sur la couche K . La formule électronique de l'atome d'hydrogène à l'état fondamental est : $(K)^1$.

2/ L'atome d'hélium a deux électrons qui trouvent place tous deux sur la couche K . La formule électronique de l'atome d'hélium à l'état fondamental est : $(K)^2$.

3/ L'atome d'aluminium comporte treize électrons. Deux d'entre eux occupent la couche K qui se trouve alors saturée. Puis huit électrons (2×2^2) saturent la couche L . Les trois électrons restants se placent sur la couche M . La formule électronique de l'atome d'aluminium à l'état fondamental est donc :



Application 2 :

Le magnésium ($Z=12$) donne des ions Mg^{2+} ; l'oxygène ($Z=8$) donne des ions O^{2-} . Quelles sont les formules électroniques de ces deux ions dans leur état fondamental ?

1/ L'ion magnésium porte deux charges élémentaires positives : c'est un atome de magnésium qui a perdu deux électrons. Le noyau est entouré par dix électrons seulement : deux électrons se placent sur la couche K et les huit qui restent saturent la couche L . La formule électronique de l'ion magnésium à l'état fondamental est donc : $(K)^2(L)^8$.

2/ L'ion oxyde O^{2-} est un atome d'oxygène qui a capté deux électrons; son noyau, qui comporte huit protons, est alors entouré par dix électrons : la couche K est occupée par deux électrons et la couche L accueille les huit autres. La formule électronique de l'ion O^{2-} est donc la même que celle de l'ion magnésium : $(K)^2(L)^8$.

(*) Notons toutefois que la couche n peut commencer à se remplir avant que la couche $n-1$ soit saturée (voir § 26.2.3).

26.2 classification périodique

26.2.1 principe

La connaissance de la structure électronique des atomes des différents éléments nous permet de comprendre le principe de classification connu sous le nom de *classification périodique des éléments* :

- Les éléments sont classés par numéro atomique croissant.
- Les éléments dont les atomes ont le même nombre d'électrons sur leur couche externe sont disposés dans une même colonne verticale. Une nouvelle ligne du tableau, appelée « période », est utilisée chaque fois que le remplissage électronique fait intervenir une nouvelle couche.

Remarque : Dans cette classification, chaque élément se voit attribuer une seule place. Les atomes dont les noyaux comportent un même nombre de protons mais des nombres différents de neutrons appartiennent au même élément : ils correspondent donc à une même case de la classification.

26.2.2 les trois premières périodes

La couche *K* étant saturée avec deux électrons, la première période comprend seulement les deux éléments de numéro atomique 1 et 2 : ce sont l'hydrogène ($Z=1$) et l'hélium ($Z=2$) dont nous avons vu les structures dans l'application du *paragraphe* 26.1.3.

Le lithium ($Z=3$) possède un électron de plus que l'hélium. Ce troisième électron ne peut se placer sur le niveau *K* en raison du Principe de Pauli ; il occupe donc la couche *L*, et le lithium est le premier élément de la deuxième période. La couche *L* étant saturée avec huit électrons, la deuxième période comporte huit éléments dont le numéro atomique est compris entre 3 et 10. Ce sont :

Z	nom	symbole	formule
3	lithium	Li	$(K)^2(L)^1$
4	béryllium	Be	$— (L)^2$
5	bore	B	$— (L)^3$
6	carbone	C	$— (L)^4$
7	azote	N	$— (L)^5$
8	oxygène	O	$— (L)^6$
9	fluor	F	$— (L)^7$
10	néon	Ne	$— (L)^8$

Avec le sodium ($Z=11$) commence le remplissage de la troisième couche, la couche *M*, et la troisième période de la classification. Le tableau ci-dessous indique quels sont les éléments de cette troisième période.

Z	nom	symbole	formule
11	sodium	Na	$(K)^2(L)^8(M)^1$
12	magnésium	Mg	$— (M)^2$
13	aluminium	Al	$— (M)^3$
14	silicium	Si	$— (M)^4$
15	phosphore	P	$— (M)^5$
16	soufre	S	$— (M)^6$
17	chlore	Cl	$— (M)^7$
18	argon	Ar	$— (M)^8$

26.2.3 anomalies de remplissage

Remarquons qu'après l'argon, la couche *M*, qui correspond au nombre quantique $n=3$, n'est pas encore saturée puisqu'elle peut contenir 2×3^2 soit 18 électrons. Et cependant avec l'élément de numéro atomique 19, le potassium, commence le remplissage de la quatrième couche, la couche *N* : toutes les propriétés du potassium s'accordent en effet avec l'existence d'un seul électron sur la couche la plus externe. Sa formule électronique est donc $(K)^2(L)^8(M)^8(N)^1$.

La quatrième période comporte dix-huit éléments et se termine avec le krypton ($Z=36$) dont la structure électronique est $(K)^2(L)^8(M)^{18}(N)^8$.

Bien que la couche *N*, qui peut contenir 32 électrons, ne soit pas saturée, on observe avec l'élément de numéro atomique 37, le rubidium, le début du remplissage de la cinquième couche, la couche *O*. La cinquième période, qui va du rubidium au xénon ($Z=54$), comporte, elle aussi, dix-huit éléments. Puis commencent, avec le césium, le remplissage de la sixième couche et la sixième période, qui comporte trente-deux éléments.

Remarque : Les anomalies de remplissage que nous avons rencontrées montrent que la Règle de construction n'est qu'une première approche du problème.

26.2.4 présentation de la classification

Nous avons vu que les cinq premières périodes comportent respectivement 2, 8, 8, 18 et 18 éléments. C'est la raison pour laquelle la présentation la plus courante de la classification utilise un tableau à dix-huit colonnes.

1 ^{re} période	1 H																	2 He
2 ^e période	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3 ^e période	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4 ^e période	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5 ^e période	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6 ^e période	55 Cs	56 Ba	57 La*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7 ^e période	87 Fr	88 Ra	89 Ac**	104 Ku	105 Ha	106	107	108	109									

*Lanthanides	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
**Actinides	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lw

Classification périodique. Les symboles des éléments sont accompagnés de leur numéro atomique respectif.

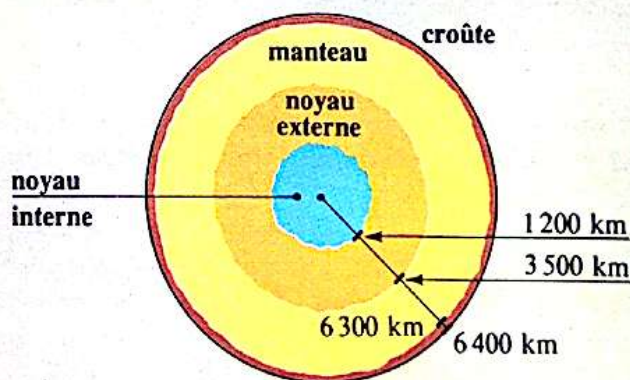
26.3 étude de quelques familles

26.3.1 éléments de la première colonne

D'après le principe même de construction du tableau périodique, les atomes des éléments de cette colonne possèdent tous un seul électron sur leur couche électronique externe. On rencontre successivement :

Z	nom	symbole	formule électronique
3	lithium	Li	$(K)^2(L)^1$
11	sodium	Na	$(K)^2(L)^8(M)^1$
19	potassium	K	$(K)^2(L)^8(M)^8(N)^1$
37	rubidium	Rb	$(K)^2(L)^8(M)^{18}(N)^8(O)^1$
55	césium	Cs	$(K)^2(L)^8(M)^{18}(N)^{18}(O)^8(P)^1$

Les éléments les plus courants sont le potassium et le sodium, qui sont un des constituants importants de la croûte terrestre.



3. Structure de la terre. Le noyau interne est principalement constitué de fer solide; le noyau externe est du fer liquide. Le manteau et la croûte contiennent surtout des silicates de différents éléments métalliques.

O	Si	Al	Fe	Ca	Na	K	Mg
47	27	8	5	3,5	2,5	2,5	2,5

4. Pourcentage en masse des principaux éléments de la croûte terrestre.

Tous les laboratoires de chimie possèdent des échantillons du métal sodium. C'est un solide, conservé à l'abri de l'air dans l'huile de naphte. Très mou, il peut être coupé au couteau. La coupure présente un éclat métallique mais se ternit rapidement par formation d'un oxyde au contact de l'air.

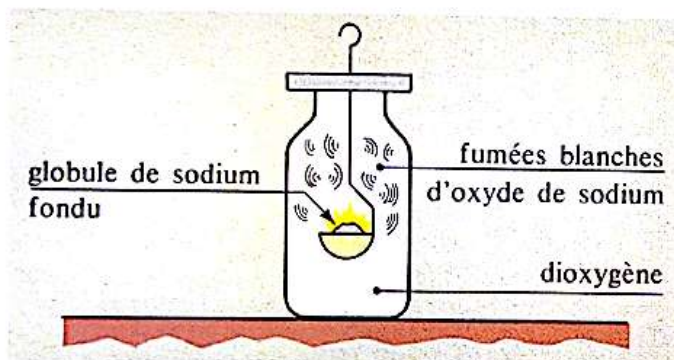
Le métal sodium réagit violemment sur l'eau (fig. 5) : on observe un dégagement de dihydrogène tandis que des ions sodium Na^+ et hydroxyde OH^- apparaissent dans la solution.

Le métal sodium réagit à chaud sur le dioxygène (fig. 6) pour donner un oxyde constitué par un assemblage d'ions sodium Na^+ et oxyde O^{2-} .

Les autres éléments de cette colonne présentent des propriétés voisines de celles du sodium. Les corps simples correspondants sont appelés métaux alcalins.

Les éléments de la première colonne de la classification forment la famille des « métaux alcalins » caractérisés par :

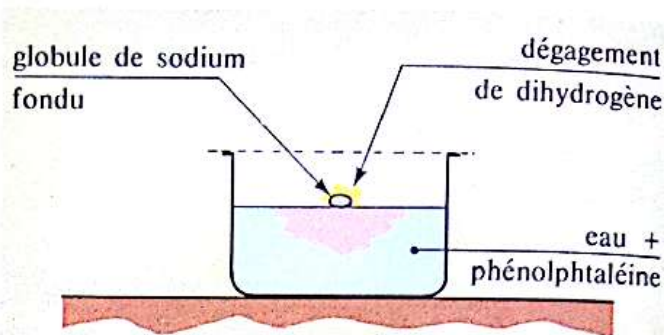
- des atomes qui possèdent un seul électron sur la couche externe;
- des corps simples métalliques, mous et peu denses;
- une grande réactivité chimique qui se manifeste par la formation d'ions positifs porteurs d'une charge élémentaire.



26.3.2 éléments de la dernière colonne

Z	nom	symbole	formule électronique
2	hélium	He	$(K)^2$
10	néon	Ne	$(K)^2(L)^8$
18	argon	Ar	$(K)^2(L)^8(M)^8$
36	krypton	Kr	$(K)^2(L)^8(M)^{18}(N)^8$
54	xénon	Xe	$(K)^2(L)^8(M)^{18}(N)^{18}(O)^8$

Remarquons qu'à l'exception de l'hélium, tous les éléments de cette colonne ont une même structure électronique externe, constituée par un ensemble de huit électrons, appelé octet.



5. Réaction du métal sodium sur l'eau. Le morceau de sodium, moins dense que l'eau, flotte. Sa réaction avec l'eau est si vive qu'il fond! On observe un dégagement de dihydrogène. Il y a formation d'ions Na^+ et d'ions OH^- mis en évidence par la coloration violette de la phénolphtaléine.

6. Combustion du métal sodium dans le dioxygène. La combustion s'accompagne de petites flammes jaunes et de fumées blanches constituées par de petits cristaux d'oxyde de sodium.

L'expérience montre que ces éléments ne donnent pratiquement pas de réactions chimiques. Cette inertie chimique est confirmée par le caractère monoatomique des molécules des corps simples. Dans les conditions ordinaires de température et de pression, tous les corps simples correspondants sont gazeux et existent dans l'air en faible proportion, d'où le nom de *gaz rares* parfois donné à ces éléments. On les appelle aussi *gaz nobles* pour rappeler qu'ils ne daignent généralement pas participer aux réactions chimiques.

Les éléments de la dernière colonne de la classification forment la famille des « gaz nobles » caractérisés par :

- des atomes qui possèdent, à l'exception de l'hélium, huit électrons sur leur couche externe;
- des corps simples monoatomiques, gazeux à la température et sous la pression ordinaire;
- une absence quasi totale de réactivité chimique.

26.3.3 éléments de l'avant-dernière colonne

Z	nom	symbole	formule électronique
9	fluor	F	$(K)^2(L)^7$
17	chlore	Cl	$(K)^2(L)^8(M)^7$
35	brome	Br	$(K)^2(L)^8(M)^{18}(N)^7$
53	iode	I	$(K)^2(L)^8(M)^{18}(N)^{18}(O)^7$

Remarquons une fois de plus l'identité des structures électroniques externes et examinons quelques propriétés de ces éléments appelés halogènes.

Les corps simples correspondants existent sous forme de molécules diatomiques. A l'exception du difluor, ils sont présents dans les laboratoires de tous les lycées. A la température et la pression ordinaires, le difluor F_2 est gazeux; il en est de même du dichlore Cl_2 , reconnaissable à sa couleur jaune verdâtre. Le dibrome Br_2 est un liquide rouge et le diiode I_2 un solide gris brillant. En chauffant légèrement un tube contenant quelques gouttes de dibrome ou quelques cristaux de diiode, il est facile d'obtenir d'abondantes vapeurs, rouges pour Br_2 , violettes pour I_2 . Mais attention : tous ces corps simples sont très toxiques!



7. A l'état gazeux, les corps simples Cl_2 , Br_2 et I_2 sont faciles à reconnaître : Cl_2 est vert-jaune, Br_2 rouge et I_2 violet.

Les corps simples Cl_2 , Br_2 , I_2 réagissent facilement sur de nombreux métaux tels que le fer, le cuivre, l'aluminium... Ils donnent, par exemple en réagissant sur les métaux alcalins, des ions négatifs porteurs d'une charge élémentaire : ion chlorure Cl^- , ion bromure Br^- ...

Les éléments de l'avant-dernière colonne forment la famille des « halogènes » caractérisés par :

- des atomes qui possèdent une couche électronique externe à sept électrons;
- des corps simples diatomiques;
- une grande réactivité chimique qui se manifeste par la formation d'ions négatifs porteurs d'une charge élémentaire.



8. Combustion du métal fer dans le dichlore.

26.4 intérêt de la classification périodique

26.4.1 propriétés chimiques d'un élément et place dans la classification

Les trois exemples de « familles » que nous venons d'étudier montrent que des éléments appartenant à une même colonne de la classification présentent une grande similitude de propriétés chimiques. De plus, d'après le principe même de la classification, les atomes de ces éléments ont une même structure électronique externe. Nous pouvons donc conclure que :

- Les propriétés chimiques des atomes d'un élément sont déterminées par leur structure électronique externe.

Comme la structure électronique externe détermine à la fois les propriétés chimiques et la place dans la classification périodique, il existe donc une relation entre propriétés chimiques et place dans la classification. C'est cette relation qui fait l'intérêt de la classification périodique pour les chimistes. Illustrons-la par l'étude de la formation des ions.

26.4.2 formation d'ions

Nous avons vu que les atomes des métaux alcalins ont un électron sur leur couche externe. Au cours des réactions chimiques, ils cèdent cet électron et donnent naissance à des ions positifs porteurs d'une seule charge élémentaire.

A l'autre bout du tableau périodique, les atomes des halogènes ont tous sept électrons sur leur couche externe; au cours des réactions chimiques, ils essaient, en capturant un électron, de former des ions porteurs d'une seule charge négative.

Dans un cas comme dans l'autre, les ions formés possèdent donc la structure électronique d'un gaz noble. Nous pouvons généraliser ce résultat :

- Au cours des réactions chimiques, les atomes réagissent pour obtenir une structure électronique plus stable que la leur : ils tentent d'acquérir la structure électronique particulièrement stable des gaz nobles. Un des moyens qui s'offre à eux est la formation d'ions.

Il faut donc aux atomes gagner ou perdre des électrons. Or la facilité de formation d'un ion décroît avec sa charge (en valeur absolue) : à cause des interactions électrostatiques, arracher un électron à un cation (ion positif) est plus difficile que d'en arracher un à l'atome correspondant; de même ajouter un électron à un anion (ion négatif) est plus difficile que de l'ajouter à l'atome correspondant.

Les éléments essaient donc d'acquérir la structure électronique du gaz noble le plus proche d'eux dans la classification. Autrement dit :

- Les éléments des premières colonnes de la classification ont tendance à perdre des électrons pour donner des ions positifs, tandis que ceux des dernières colonnes ont tendance à capter des électrons pour donner des ions négatifs.

L'expérience vérifie parfaitement ces prévisions :

— Les éléments de la deuxième colonne, appelés *métaux alcalino-terreux*, perdent, au cours des réactions chimiques, deux électrons pour donner naissance à des ions du type X^{2+} , tels les ions magnésium Mg^{2+} , calcium Ca^{2+} , etc.

— Les atomes des éléments de la colonne de l'oxygène ont tendance à capter deux électrons pour donner naissance à des ions du type Y^{2-} , tels les ions oxyde O^{2-} , sulfure S^{2-} , etc.

Qu'advient-il des éléments qui appartiennent à des colonnes éloignées des extrémités de la classification? Examinons par exemple le cas du carbone.

Dans son état fondamental, l'atome de carbone ($Z=6$) a comme formule électronique : $(K)^2(M)^4$.

Le gaz noble qui le précède dans la classification est l'hélium ($Z=2$) dont la formule électronique est : $(K)^2$.

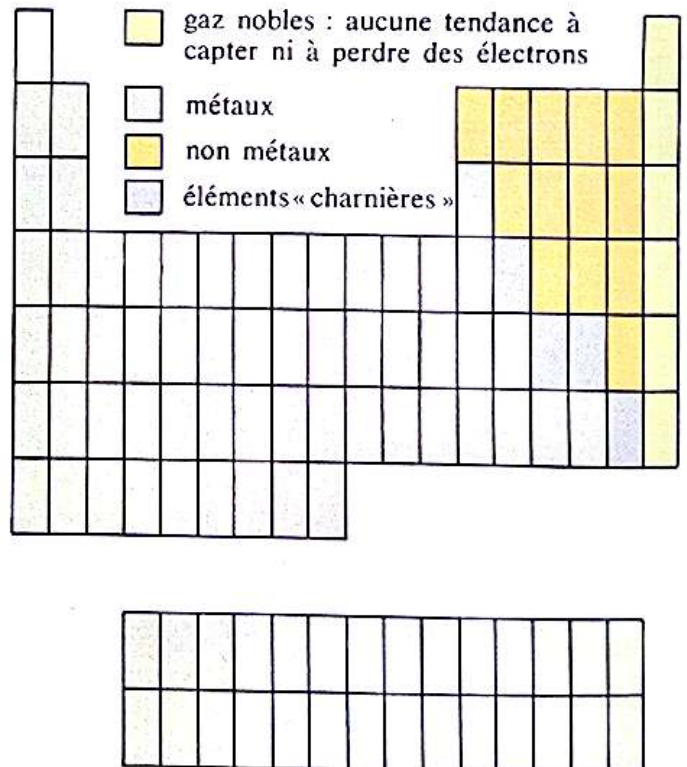
Le gaz noble qui suit l'élément carbone dans la classification est le néon ($Z=10$) dont la formule électronique est : $(K)^2(M)^8$.

Pour obtenir la structure électronique de l'hélium, l'atome de carbone doit donc perdre quatre électrons et donner naissance à un ion C^{4+} . S'il veut acquérir celle du néon, il lui faut capter quatre électrons et donner un ion C^{4-} . Mais la formation de ces ions fortement chargés est si difficile qu'ils n'apparaissent au cours d'aucune réaction chimique.

26.4.3 différentes zones du tableau périodique

Selon l'aptitude des atomes à capter ou à perdre des électrons, on peut distinguer plusieurs zones dans le tableau périodique des éléments (fig. 9) :

- La plus vaste correspond à des éléments plutôt « donneurs d'électrons » : ces éléments sont des métaux.
- La deuxième regroupe les éléments plutôt « attracteurs d'électrons »; ce sont les « non-métaux ».
- La troisième est la colonne des gaz nobles, qui ne sont ni donneurs ni accepteurs d'électrons.



9. Les différentes zones du tableau périodique.

Aperçu historique sur la classification des éléments

Il est bien évident que la classification périodique, telle que nous l'avons présentée, n'a pu être élaborée que progressivement. La découverte, aux XVIII^e et XIX^e siècles, de nombreux corps simples — notion longtemps confondue avec celle d'élément — puis l'étude de leurs propriétés permirent la mise en évidence d'analogies.

Le premier critère pour présider à une classification fut donc l'analogie de propriétés chimiques présentées par plusieurs éléments. C'est ainsi que, vers 1826, le chimiste français Jean-Baptiste Dumas définit des *familles* d'éléments : les halogènes, les métaux alcalins, ... L'idée d'une *périodicité* dans des analogies de propriétés chimiques fut dégagée plus tard. Chaque élément était alors caractérisé non par son numéro atomique, totalement ignoré à l'époque, mais par sa masse atomique.

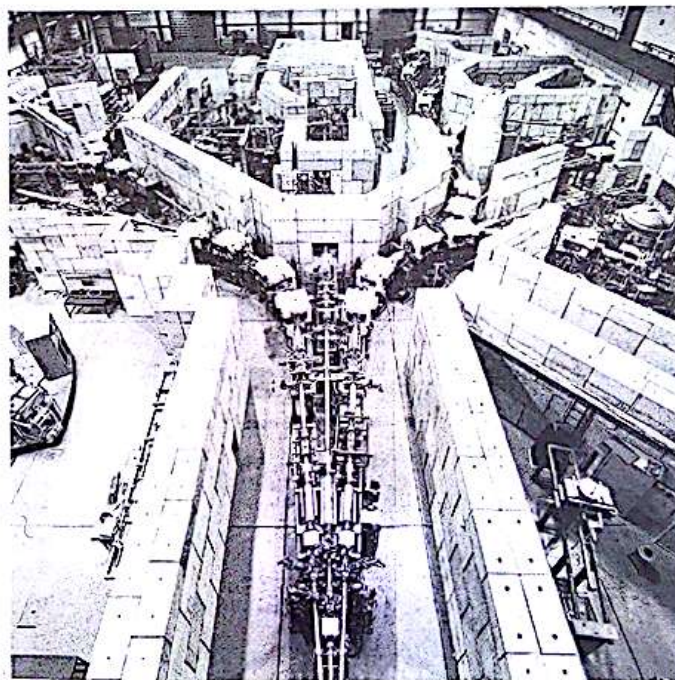
Ce fut le mérite du chimiste russe Mendeleïev de développer ces idées et de proposer, en 1869, la première classification périodique, qui porte son nom. Classant les éléments par ordre de masse atomique croissante, il définit des *périodes* d'éléments, chacune d'elles commençant par un métal alcalin. Afin de rassembler dans une même colonne les éléments possédant des propriétés chimiques analogues, il fut obligé de laisser vides certaines cases de son tableau. C'est ainsi qu'au-dessous de l'aluminium et du silicium, il laissa deux cases inoccupées. Il

prédit alors qu'on découvrirait deux éléments — il les nomma ékaaluminium et ékasilicium — qui occuperaient les cases laissées vides entre le silicium et l'étain. Par interpolation, il prédit aussi la masse atomique approchée et les principales propriétés chimiques de l'ékasilicium. Il effectua de même des prévisions sur l'ékaaluminium.

En 1875, l'ékaaluminium, prévu par Mendeleïev, fut découvert par le chimiste français Lecoq de Boisbaudran, qui appela ce nouvel élément *gallium*. Les propriétés du gallium confirmaient parfaitement les prévisions de Mendeleïev concernant l'ékaaluminium. Ce fut ensuite la découverte de l'ékasilicium, appelé *germanium* par le chimiste allemand Winkler (1886), découverte qui confirma, de façon éclatante, la justesse des vues de Mendeleïev. Cette classification se révéla ainsi très féconde et fut le point de départ de l'idée de périodicité que nous avons justifiée en utilisant la répartition des électrons dans l'atome.

La classification actuelle comprend 109 éléments, mais tous les éléments dont le numéro atomique est supérieur à 83 ont des noyaux instables qui se désintègrent spontanément. Les nucléides correspondants sont appelés *radionucléides*.

Dimitri Mendeleïev (1834-1907).



Cet accélérateur d'ions lourds, situé à Darmstadt (R.F.A.), a permis d'obtenir un atome de l'élément 109 en 1982 et trois atomes de l'élément 108 en 1984!

De nombreux laboratoires de physique nucléaire cherchent à présent à fabriquer les éléments suivants, d'autant plus que, d'après certaines théories, les noyaux des éléments *super-lourds* ($Z > 110$) ne seraient plus instables. En attendant leur préparation, les chimistes, reprenant les idées de Mendeleïev, ont déjà prévu les propriétés physiques et chimiques de ces éléments encore hypothétiques.



Le lanthane et les lanthanides forment un ensemble de quinze éléments, aux propriétés chimiques très voisines, souvent improprement appelés « terres rares ». Ces éléments occupent une seule et même case de la sixième ligne de la classification périodique à dix-huit colonnes. (Ils sont répertoriés dans une ligne spécifique, située en dessous de la classification.) En effet, leur structure électronique externe est identique; ils ne diffèrent qu'au niveau de leur couche N, interne.

Le dopage du sulfure de zinc par les cations de terres rares permet d'obtenir des corps qui, sous l'impact d'un faisceau d'électrons, émettent de la lumière rouge, verte ou bleue. Cette propriété est utilisée pour la construction des écrans de télévision couleur.

Faire le point

- Selon quel critère classe-t-on les électrons d'un atome ou d'un ion?
- Quels sont les électrons les plus liés au noyau : ceux de la couche K ou ceux de la couche L ?
- Énoncer le Principe de Pauli.
- Quel est le nombre quantique de la couche M ? Quel est le nombre maximal d'électrons qu'elle peut contenir?
- Qu'appelle-t-on « état fondamental » d'un atome?
- Énoncer la « règle de construction » de la structure électronique d'un atome dans l'état fondamental.
- Soit un ion ${}_Z X^{P+}$. Quel est l'élément dont les atomes ont la même structure électronique?
- Quel est le principe de la classification périodique des éléments?
- Qu'appelle-t-on « période » de la classification? Combien d'éléments comporte la première période? la deuxième période?
- Qu'ont de commun les atomes des éléments situés dans une même colonne de la classification?
- Dans quel colonne de la classification se situe la famille des « gaz nobles »? celle des « métaux alcalins »? celle des « halogènes »?
- Comparer la réactivité chimique des « gaz nobles », des « métaux alcalins » et des « halogènes ».
- Par quoi sont déterminées les propriétés chimiques des atomes d'un élément?
- Quel est le but des atomes au cours des réactions chimiques?
- Quelles sont les trois grandes zones de la classification périodique?

26.1 Quel est le nombre de protons et de neutrons du nucléide caractérisé par le couple (14, 28)?

De quel élément s'agit-il?

Dans quelle colonne de la classification périodique se trouve cet élément?

Établir la structure de l'atome dans l'état fondamental.

26.2 Mêmes questions pour le nucléide caractérisé par le couple (10, 20).

26.3 Comparer les structures électroniques de l'ion chlorure, de l'ion potassium et de l'ion calcium. Quelles formules peut-on attribuer au chlorure de potassium et au chlorure de calcium?

26.4 1/ Quel est l'élément qui, dans la classification périodique, se trouve à l'intersection de la troisième période et de la quinzième colonne? A quelle couche appartiennent ses électrons les plus externes dans l'état fondamental?

2/ Établir sa formule électronique complète et vérifier la réponse à la question précédente.

3/ Déterminer la composition de son noyau sachant que son nombre de masse est 31.

26.5 La formule électronique d'un ion porteur de deux charges élémentaires positives est $(K)^2(L)^8(M)^8$. A quel élément appartient-il? Quelle est la formule de l'oxyde de cet élément?

26.6 Les éléments sodium et potassium sont d'importants constituants de la croûte terrestre. Cependant on ne connaît aucun gisement de sodium ou de potassium natif. Pourquoi? Calculer les masses de sodium et de potassium contenues dans la croûte terrestre (cf. figures 3 et 4, page 259).

Données : la Terre est une sphère de 6 400 km de rayon; l'épaisseur de la croûte est de 70 km; la masse volumique de la croûte est de $2,8 \text{ g.cm}^{-3}$.

26.7 Tous les métaux alcalino-terreux donnent des ions M^{2+} . Écrire la formule électronique de chacun d'eux. Que remarque-t-on?

26.8 Quel est l'élément dont les atomes possèdent la formule électronique suivante : $(K)^2(L)^7(M)^1$? Quelle particularité possède un atome ayant cette structure électronique? Quelles sont les propriétés chimiques des atomes de cet élément?

26.9 Parmi les formules électroniques suivantes, un certain nombre correspondent aux atomes d'un même élément. Lesquelles et de quel(s) élément(s) s'agit-il?

$(K)^2(L)^7(M)^3$; $(K)^2(L)^8(M)^2$; $(K)^2(L)^9(M)^1$; $(K)^2(L)^8(M)^4$.

26.10 Sachant qu'un homme de 70 kg a en moyenne 5 litres de sang, que chaque mm^3 de sang contient 5,6 millions de globules rouges et que chaque globule rouge contient quatre atomes de fer, calculer la masse de fer correspondante.

26.11 Dans Athalie, tragédie de Racine, le grand prêtre Joad s'écrie :

« Comment en un plomb (vil) 207 l'or (pur) 197 s'est-il changé? »

Que doit-on lui répondre?

Vue d'ensemble sur les structures de la matière

Signification des formules

27.1 la mole, unité de quantité de matière

27.1.1 définition

Nous avons déjà noté que des échantillons qui nous semblent très petits contiennent néanmoins un nombre énorme d'atomes.

Exemple :

Calculons le nombre d'atomes contenus dans un volume de 1 mm^3 de métal cuivre, sachant qu'un atome de cuivre a une masse de $10,5 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$.

Calculons d'abord la masse, m , de 1 mm^3 de métal cuivre. La valeur de la masse volumique, ρ , figure dans la classification périodique de la page 00 :

$$\rho = 8,96 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}.$$

$$m = \rho \cdot V,$$

soit, comme : $1 \text{ mm}^3 = 10^{-3} \text{ cm}^3$,

$$m = 8,96 \cdot 10^{-3} \text{ g} = 8,96 \cdot 10^{-6} \text{ kg}.$$

Le nombre d'atomes contenus dans 1 mm^3 de cuivre est donc :

$$\frac{8,96 \cdot 10^{-6}}{10,5 \cdot 10^{-26}} = 8,5 \cdot 10^{19}!$$

Il est donc impossible, à notre échelle, de mesurer une quantité de matière par le dénombrement des particules qu'elle comporte. Nous avons vu de même que la mesure d'une charge électrique ne se fait pas en décomptant les électrons cédés ou gagnés, mais grâce à une unité de charge appropriée : le coulomb.

Aussi a-t-on défini une unité de quantité de matière adaptée à notre échelle : la mole. Le décret du 4 décembre 1975 définit ainsi la mole (symbole : mol) :

- La mole est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kg de carbone 12.

Lorsqu'on emploie la mole, les entités élémentaires doivent être spécifiées.

Ces entités élémentaires peuvent être des atomes, des molécules, des ions, d'autres particules ou des groupements spécifiques de telles particules.

Remarque : L'expression « carbone 12 » désigne un atome qui appartient à l'élément carbone ($Z=6$), et dont le nombre de masse A est égal à 12 : son noyau compte donc 6 protons et 6 neutrons.

27.1.2 constante d'Avogadro

Soit un système comportant N entités élémentaires, des atomes par exemple. Soit n , la quantité de matière correspondante. Si on double par exemple N , il va de soi que la quantité de matière correspondante n (exprimée en mol) est également doublée. Il existe donc une relation de proportionnalité entre N et n soit :

$$N = N_A \cdot n.$$

La constante de proportionnalité N_A est appelée **constante d'Avogadro**. Elle s'exprime en mol^{-1} puisque N est un nombre pur et que n s'exprime en mol.

On a donné le nom d'Avogadro à cette constante en l'honneur du chimiste italien Amedeo Avogadro qui, dès 1811, émit une hypothèse qui s'est révélée particulièrement féconde dans le développement de la théorie atomique (cf. chapitre 31).

La détermination de N_A a été faite à l'aide de nombreuses méthodes, et la valeur admise actuellement est :

$$N_A = 6,022\,098 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}.$$

Nous utiliserons en général les valeurs approchées :

- $6 \cdot 10^{23}$ à 0,3 % près;
- $6,02 \cdot 10^{23}$ à 0,03 % près.

Cette valeur est énorme : il faudrait 18 millions de milliards d'années pour dénombrer les atomes d'une mole à raison de un par seconde!

Remarque : On peut calculer une valeur approchée de N_A à partir de la masse d'un nucléon, voisine de $1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ (cf. paragraphe 25.3.1).

La masse de l'atome de carbone 12 est voisine de la masse de 12 nucléons, soit $1,67 \cdot 10^{-27} \times 12 \text{ kg}$; d'où la valeur approchée de N_A :

$$N_A \approx \frac{0,012}{12 \times 1,67 \cdot 10^{-27}} \approx 6 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}.$$

27.1.3 masse molaire atomique

D'après la définition même de la mole, la masse de N_A atomes de carbone 12 est 0,012 kg : nous dirons que la masse molaire atomique du carbone 12 est de $12 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$. On peut ainsi déterminer la masse d'une mole d'atomes identiques quelconques qui correspondent à un même nucléide. Cependant cette valeur n'est pas très intéressante pour le chimiste, car ce dernier ne manipule, sauf exception, que des corps dans lesquels à un élément donné correspond plusieurs nucléides mélangés dans les proportions naturelles (cf. paragraphe 25.5.2). On définit donc la masse molaire atomique de chaque élément comme étant la masse d'une mole d'atomes de cet élément, les proportions des différents nucléides étant celles que l'on rencontre dans la nature. Comme on l'a vu, ces proportions sont pratiquement indépendantes des échantillons considérés.

Les masses molaires atomiques des éléments figurent sur la classification périodique reproduite en fin d'ouvrage.



1. Amedeo Avogadro (1776-1856). Chimiste italien.

27.1.4 signification macroscopique du symbole chimique

Par convention :

- Le symbole d'un élément représente une mole d'atomes de cet élément.

Les proportions dans cette mole d'atomes des différents nucléides correspondant à cet élément sont celles que l'on rencontre dans la nature.

Application 1 :

L'élément azote à l'état naturel est formé par un mélange de deux nucléides dont les proportions sont les suivantes :

$$^{14}\text{N} : 99,636 \% ; \quad ^{15}\text{N} : 0,364 \%$$

Sachant que les masses d'une mole d'atomes de ces nucléides sont respectivement $14,00307 \text{ g}$ et $15,00011 \text{ g}$, calculer la masse molaire atomique de l'élément azote naturel.

La masse molaire atomique M_N de l'élément azote naturel est donnée par :

$$(14,00307 \times 0,99636) + (15,00011 \times 0,00364) \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1},$$

soit $M_N = 14,00669 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

27.2 molécules

Tout l'Univers est fabriqué à partir des atomes de 90 éléments. Sur Terre, ces atomes sont rarement libres : ils sont en général associés les uns aux autres pour former des édifices plus ou moins complexes. Les molécules en sont un exemple.

27.2.1 définition

Par définition :

- Une molécule est une entité chimique électriquement neutre, formée d'un nombre limité d'atomes. Le nombre d'atomes d'une molécule est son « atomicité ».

L'atomicité varie dans de larges proportions : de quelques unités pour les molécules les plus courantes, elle atteint plusieurs milliers pour les matières plastiques et pour de nombreuses molécules d'intérêt biologique telles que les protéines. On parle dans ce cas de macromolécules, mais il n'y a pas de limites précises entre molécules et macromolécules.

27.2.2 formule

A chaque type de molécule, on attribue un nom et une formule qui traduit sa composition. Règle :

- Pour écrire la formule d'une molécule, on écrit côte à côte les symboles des éléments présents dans la molécule puis précise, en indice en bas à droite, le nombre d'atomes de chaque élément. L'indice 1 n'est jamais spécifié.

Exemples :

1. L'argon, qui sert à remplir les ampoules des lampes à incandescence, est un gaz constitué de molécules monoatomiques c'est-à-dire d'atomes indépendants les uns des autres. Son atomicité est égal à 1 et sa formule s'écrit : Ar.
2. Dans l'air, l'élément oxygène est représenté par des molécules composées de deux atomes d'oxygène : ce sont des molécules de dioxygène, de formule O_2 . Dans la haute atmosphère, on rencontre aussi des molécules composées de trois atomes d'oxygène : ce sont des molécules de trioxygène, couramment appelé ozone. Leur formule est O_3 .
3. L'eau, qu'elle soit liquide, glace ou vapeur d'eau, est constituée de molécules triatomiques dans lesquelles un atome d'oxygène est lié à deux atomes d'hydrogène. La formule de la molécule d'eau est donc H_2O .
4. Le sucre, qu'il soit cristallisé ou dissous dans l'eau, est formé de molécules qui comportent douze atomes de carbone, onze atomes d'oxygène et vingt-deux atomes d'hydrogène. Sa formule est donc : $C_{12}H_{22}O_{11}$. Son nom chimique est le saccharose.

3. L'eau, qu'elle soit solide (glace), liquide ou sous forme de vapeur, a toujours comme formule H_2O . ▶

27.2.3 signification macroscopique de la formule

Par convention :

- La formule d'un corps moléculaire représente une mole de ses molécules.

Exemples :

O représente une mole d'atomes d'oxygène.
 O_2 représente une mole de molécules de dioxygène.
 O_3 représente une mole de molécules de trioxygène.

La masse d'une mole de molécules est appelée **masse molaire**; la masse molaire d'un corps moléculaire est égale à la somme des masses molaires atomiques des atomes présents dans la molécule.

Exemple :

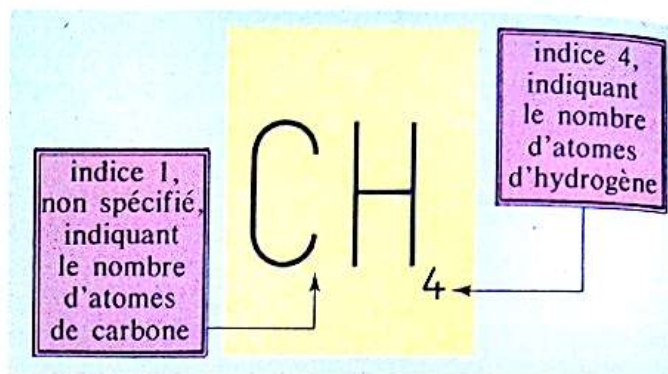
La masse molaire du dioxyde d'azote NO_2 , que l'on note M_{NO_2} , est telle que :

$$M_{NO_2} = M_N + 2 M_O.$$

Dans le tableau périodique reproduit en fin d'ouvrage, figurent les masses molaires atomiques :

$$M_N \approx 14,0 \text{ g.mol}^{-1}; \quad M_O \approx 16,0 \text{ g.mol}^{-1}.$$

Nous en déduisons : $M_{NO_2} \approx 46,0 \text{ g.mol}^{-1}$.



2. Formule du méthane.

**Application 2 :**

On exprime parfois la composition d'un corps composé par une formule centésimale, molaire ou massique. Une telle formule indique les pourcentages, molaires ou massiques, des différents éléments qui composent le corps étudié. Établir les formules centésimales du saccharose (le sucre) dont la formule est $C_{12}H_{22}O_{11}$.

1/ Formule centésimale molaire

Le pourcentage molaire d'un élément X se calcule par :

$$100 \times \frac{\text{nombre d'atomes de X dans la formule}}{\text{nombre total d'atomes dans la formule}}$$

Le saccharose est un composé moléculaire d'atomicité égale à 45. D'où :

pourcentage molaire en élément

$$\text{carbone} = 100 \times \frac{12}{45} \approx 26,7;$$

$$\text{hydrogène} = 100 \times \frac{22}{45} \approx 48,9;$$

$$\text{oxygène} = 100 \times \frac{11}{45} \approx 24,4.$$

2/ Formule centésimale massique

Le pourcentage massique d'un élément X se calcule par :

$$100 \times \frac{\text{masse de l'élément X contenu dans une mole}}{\text{masse molaire}}$$

Les masses des éléments carbone, hydrogène et oxygène contenues dans une mole de molécules de saccharose $C_{12}H_{22}O_{11}$ sont respectivement m_C , m_H et m_O telles que :

$$\begin{aligned} m_C &= 12 \times 12,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} = 144,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}, \\ m_H &= 22 \times 1,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} = 22,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}, \\ m_O &= 11 \times 16,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} = 176,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}. \end{aligned}$$

La masse molaire du saccharose est

$$M = m_C + m_H + m_O = 342 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}.$$

D'où :

pourcentage massique en élément

$$\text{carbone} = 100 \times \frac{144}{342} \approx 42,1;$$

$$\text{hydrogène} = 100 \times \frac{22}{342} \approx 6,4;$$

$$\text{oxygène} = 100 \times \frac{176}{342} \approx 51,5.$$

Naturellement la somme des pourcentages molaires ou massiques de tous les éléments présents dans le corps est égale à 100.

La masse d'un électron étant très inférieure à celle d'un atome, quel qu'il soit, la masse molaire d'un ion polyatomique se calcule en faisant la somme des masses molaires atomiques des différents atomes présents.

Exemple :

La masse molaire de l'ion sulfate est $M_{SO_4^{2-}}$ telle que :

$$\begin{aligned} M_{SO_4^{2-}} &= M_S + 4M_O = (32,1 + 4 \times 16,0) \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} \\ &= 96,1 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}. \end{aligned}$$

27.3.3 neutralité électrique

Comme nous l'avons déjà souligné, un échantillon naturel est électriquement neutre. Un type d'ion, mono- ou polyatomique, est donc toujours accompagné d'un autre type d'ions porteurs d'une charge de signe contraire.

Exemple :

Une solution de nitrate de cuivre II contient des ions nitrate NO_3^- et cuivre II Cu^{2+} . Tout échantillon de cette solution contient deux fois plus d'ions NO_3^- que d'ions Cu^{2+} afin que la neutralité électrique soit assurée.

27.3 ions polyatomiques

27.3.1 définition

Il existe aussi des édifices limités d'atomes, porteurs d'une charge électrique : ce sont des **ions polyatomiques**. Pour écrire la formule d'un ion polyatomique, on procède comme pour celle d'une molécule, mais on indique en haut à droite le signe et le nombre des charges élémentaires qu'il porte.

Exemple :

L'ion sulfate est un édifice portant deux charges élémentaires négatives. Il est constitué par un atome de soufre et quatre atomes d'oxygène. Sa formule est donc SO_4^{2-} .

Parmi les ions couramment rencontrés, citons l'ion nitrate NO_3^- , l'ion carbonate CO_3^{2-} , ...

27.3.2 signification macroscopique de la formule

Comme pour une molécule :

- La formule d'un ion polyatomique représente une mole de cet ion.

27.4 cristaux non moléculaires

27.4.1 définition

Il existe des cristaux où, contrairement aux cas du sucre ou de la glace, il est impossible de mettre en évidence des molécules : le cristal tout entier constitue une seule molécule géante. Ce type de solide est appelé **cristal non moléculaire**.

Les métaux, le chlorure de sodium, l'oxyde de cuivre II, le diamant sont des cristaux non moléculaires.

27.4.2 différents types

Selon la manière dont est assurée la cohésion du cristal non moléculaire, on distingue les cristaux *métalliques*, les cristaux *covalents* et les cristaux *ioniques*.

Les cristaux métalliques et covalents peuvent être considérés comme des assemblages d'atomes.

Par contre, les cristaux ioniques contiennent des ions régulièrement disposés dans l'espace. Les proportions des différents ions sont telles que le cristal possède une charge électrique nulle.

Exemple :

Le fluorure d'aluminium est un cristal constitué par les ions aluminium Al^{3+} et fluorure F^- . Tout échantillon de fluorure d'aluminium comporte donc trois fois plus d'ions fluorure que d'ions aluminium. Le motif du fluorure d'aluminium est l'ensemble électriquement neutre formé d'un ion aluminium et de trois ions fluorure.

Généralisons la notion de motif d'un cristal ionique. Par définition :

- Le motif élémentaire d'un cristal ionique est l'ensemble électriquement neutre minimal pouvant être constitué avec des ions présents dans le cristal.

27.4.3 formule d'un cristal non moléculaire

Pour des solides non moléculaires, la formule indique la nature et éventuellement les proportions des éléments présents. Les indices placés en bas à droite du symbole des éléments sont des nombres entiers, les plus petits possibles.

Exemples :

1. Le cristal de fer est constitué par des atomes de fer régulièrement disposés dans l'espace. Sa formule est Fe.
2. Le cristal de diamant (*fig. 4*) est un cristal covalent constitué par des atomes de carbone. Sa formule est C.
3. La formule du cristal ionique du fluorure d'aluminium est AlF_3 .

27.4.4 signification macroscopique du symbole

Par convention :

- La formule d'un cristal non moléculaire métallique ou covalent représente une mole des atomes qui constituent le cristal.
- La formule d'un cristal ionique représente une mole du motif de ce cristal.

Exemples :

1. Fe représente une mole d'atomes de fer.
2. C représente une mole d'atomes de carbone.
3. AlF_3 représente une mole de motifs élémentaires qui comportent chacun un ion aluminium III et trois ions fluorure. Autrement dit, AlF_3 correspond à une mole d'ions aluminium et à trois moles d'ions fluorure.

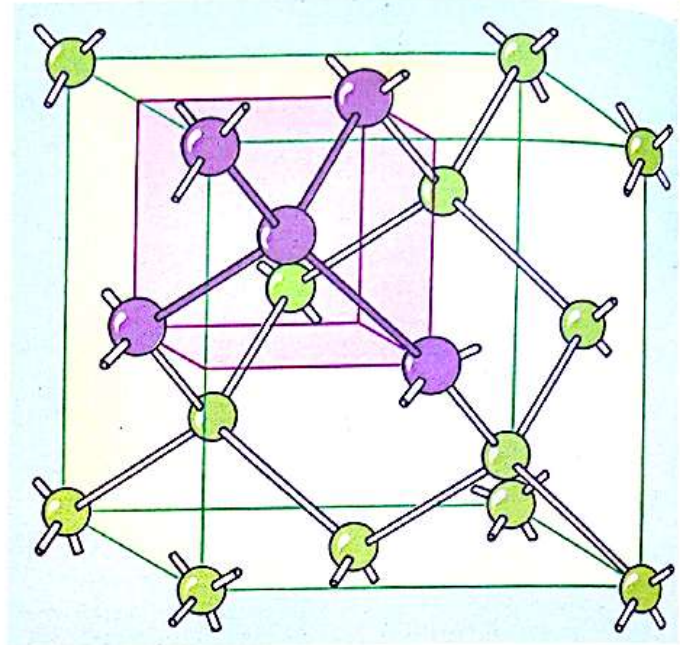
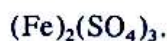
Application 3 :

Établir la formule du sulfate de fer III en admettant qu'il est constitué par des ions Fe^{3+} et des ions sulfate SO_4^{2-} .

La formule du sulfate de fer III est donc de la forme $(\text{Fe})_x(\text{SO}_4)_y$, où x et y sont deux nombres entiers les plus petits possibles. Écrivons que la charge du motif est nulle :

$$x(+3) + y(-2) = 0, \text{ soit, } x = \frac{2}{3} y.$$

x devant être entier, la plus petite valeur de y est 3, et $x = 2$. La formule du sulfate de fer III est donc :



4. Structure du cristal de diamant.



5. Diamant dans sa gangue.

Faire le point

- Quelle est l'unité de quantité de matière?
- Que représente la constante d'Avogadro? Quelle est sa valeur approchée?
- Que signifie l'expression « carbone 12 »?
- Définir la masse molaire atomique.
- Quelle est la signification macroscopique du symbole d'un élément?
- Qu'est-ce qu'une molécule?
- Définir l'atonicité d'une molécule. Qu'est-ce qu'une macromolécule?
- Quelles sont les règles d'écriture de la formule d'une molécule?
- Définir les termes : cristal moléculaire; cristal non-moléculaire. Combien de types de cristaux non-moléculaires distingue-t-on?
- Que représente la formule d'une molécule? d'un cristal ionique?
- Comment calcule-t-on la masse molaire d'un corps?
- Définir un corps simple et un corps composé. Donner deux exemples.

27.1 Écrire les formules des molécules suivantes; calculer leur atonicité; préciser si ce sont des corps simples ou composés :

diazote; néon; dioxyde d'azote; octasoufre; pentachlorure de phosphore; hexafluorure d'uranium; tétraphosphore.

27.2 Combien y a-t-il de moles d'eau dans un litre d'eau? La masse volumique de l'eau liquide est voisine de $10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Combien y a-t-il de molécules dans un litre d'eau?

27.3 Quel est le nombre d'électrons présents dans les ions suivants :

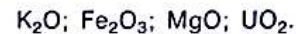
nitrate NO_3^- ; sulfate SO_4^{2-} ; carbonate CO_3^{2-} ; bromure Br^- ; ammonium NH_4^+ ?

27.4 Les bougies sont constituées de molécules d'acide stéarique de formule $\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$. Quelle est l'atonicité de l'acide stéarique? Quelle est sa masse molaire? Combien y a-t-il de moles d'acide stéarique dans une bougie de 150 g? Combien y a-t-il de molécules?

27.5 Que représentent les deux symboles $\frac{1}{2}\text{O}_2$ et O au niveau macroscopique? au niveau atomique? Comparer la masse et les propriétés chimiques des deux systèmes correspondants.

27.6 1/ Quel type d'ions l'élément oxygène donne-t-il? Établir la formule électronique de l'ion oxyde.

2/ Déterminer quelle est la charge des cations dans les cristaux ioniques de motif suivant :



27.7 Déterminer la quantité de matière contenue dans 100 g des corps suivants :

dihydrogène; diiode; bromure de potassium KBr; chlorophylle $\text{C}_{55}\text{H}_{72}\text{N}_4\text{O}_5\text{Mg}$.

27.8 Les gaz produits par certaines usines chimiques et par les foyers domestiques ou industriels contiennent du dioxyde de soufre dont la présence dans l'air est l'une des causes les plus importantes de la pollution atmosphérique.

On considère que l'air est pollué si la teneur en dioxyde de soufre dépasse $30 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$.

On prélève dans une ville 50 l d'air; l'analyse révèle la présence de 0,012 mg de dioxyde de soufre. L'air est-il pollué?

27.9 Calculer la composition centésimale molaire et massique des molécules suivantes : NO; NO_2 ; N_2O_5 .

Les molécules

La liaison covalente

28.1 existence des molécules

L'existence de molécules, considérées comme des assemblages limités d'atomes, est démontrée par de nombreuses preuves expérimentales. Citons notamment :

- la diffusion des odeurs, agréables ou nauséabondes, dans l'air;
- la compressibilité et l'expansibilité des gaz;
- le bleu du ciel!

Certaines grosses molécules ont pu même être photographiées au microscope électronique (*photo 1*).

28.2 structure géométrique des molécules

28.2.1 stéréochimie

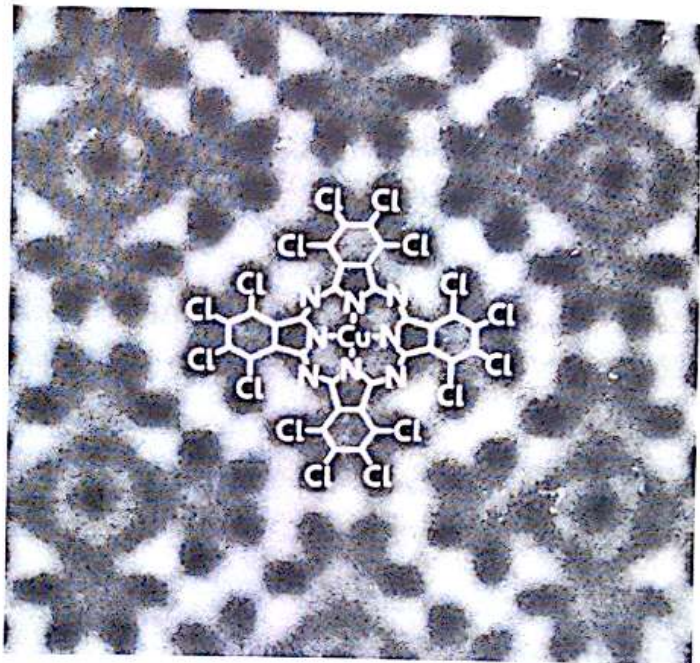
Une molécule est donc constituée par un certain nombre de noyaux chargés positivement autour duquel tourbillonnent des électrons, la charge négative des électrons compensant exactement la charge positive des noyaux. Les électrons constituent un « nuage » réparti sur tous les atomes de la molécule.

Les noyaux, beaucoup plus lourds que les électrons, gardent des positions moyennes fixes les uns par rapport aux autres : chaque molécule possède ainsi une **structure géométrique**. La connaissance de cette structure permet de mieux comprendre les propriétés physiques et chimiques du corps correspondant. La partie de la Chimie qui étudie les relations entre structure géométrique et propriétés s'appelle la **stéréochimie**.

28.2.2 représentation

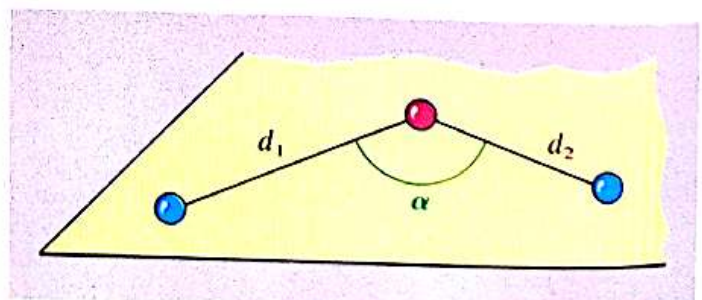
Il est bien sûr impossible de mesurer directement les distances entre les noyaux des atomes (appelées *distances internucléaires*), mais on sait les déterminer indirectement avec une grande précision.

- Si la molécule est diatomique, une seule longueur suffit à caractériser sa structure : c'est la distance internucléaire, ou longueur de liaison, entre les deux atomes.



1. Molécule de phtalocyanine de cuivre.

- Lorsque la molécule est triatomique, les trois noyaux sont nécessairement dans un même plan : deux distances et un angle sont nécessaires pour décrire la structure (*fig. 2*). L'angle peut être égal à 180° .
- Dès que l'atomicité est supérieure à 3, les atomes peuvent être disposés dans l'espace à trois dimensions. La représentation de la molécule par un schéma devient alors plus délicate. Les chimistes ont donc pris l'habitude d'utiliser des *modèles moléculaires*.



2. Pour décrire la géométrie d'une molécule triatomique, un angle et deux distances sont nécessaires.

28.3 la liaison chimique à l'intérieur d'une molécule de dihydrogène

28.3.1 pourquoi des molécules de dihydrogène?

Pourquoi, sur Terre, le corps simple correspondant à l'élément hydrogène est-il le dihydrogène H_2 et non l'atome d'hydrogène H ? Pourquoi, dans les mêmes conditions, le corps simple correspondant à l'argon est-il l'atome d'argon Ar ?

L'étude de la classification périodique nous a montré que les propriétés chimiques d'un atome sont déterminées par sa structure électronique externe. Cela nous fournit les réponses aux questions précédentes :

Si l'atome d'argon n'a aucune tendance à se lier à d'autres atomes, c'est-à-dire à modifier sa structure électronique externe, c'est que cette structure, comme celle de tous les gaz nobles, est très stable. Celle de l'atome d'hydrogène l'est certainement moins puisque celui-ci cherche à la modifier au cours de réactions chimiques, par exemple en formant des molécules de dihydrogène.

Les atomes d'hydrogène forment des molécules de dihydrogène afin d'acquérir une structure électronique plus stable.

Peuvent-ils ainsi obtenir la structure électronique externe particulièrement stable des gaz nobles?

28.3.2 comment?

Le gaz noble le plus proche de l'hydrogène est l'hélium ($Z=2$) dont l'atome a un électron de plus que l'atome d'hydrogène.

Deux atomes d'hydrogène sont exactement semblables : aucun d'eux n'arrive donc à dépouiller son voisin de son électron pour acquérir la structure électronique de l'atome d'hélium. Ils peuvent en revanche « coopérer » en mettant en commun leur électron : le doublet ainsi formé confère alors à chacun d'eux la structure électronique stable de l'atome d'hélium.

Dans la molécule de dihydrogène, chaque atome d'hydrogène possède le même nombre d'électrons que le gaz noble hélium grâce à la mise en commun d'un doublet d'électrons.

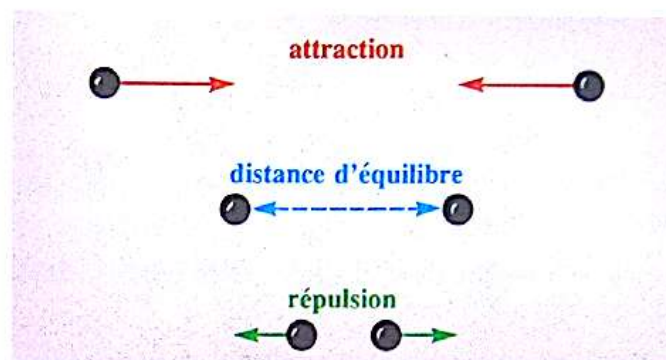
28.3.3 distance internucléaire d'équilibre

Considérons le système formé par deux atomes d'hydrogène, c'est-à-dire par deux protons et deux électrons. Il existe entre ces particules chargées des interactions électriques : par exemple chaque électron est soumis simultanément à l'attraction des deux noyaux et à la répulsion de l'autre électron; de même chaque noyau est soumis à l'attraction des deux électrons et à la répulsion de l'autre noyau.

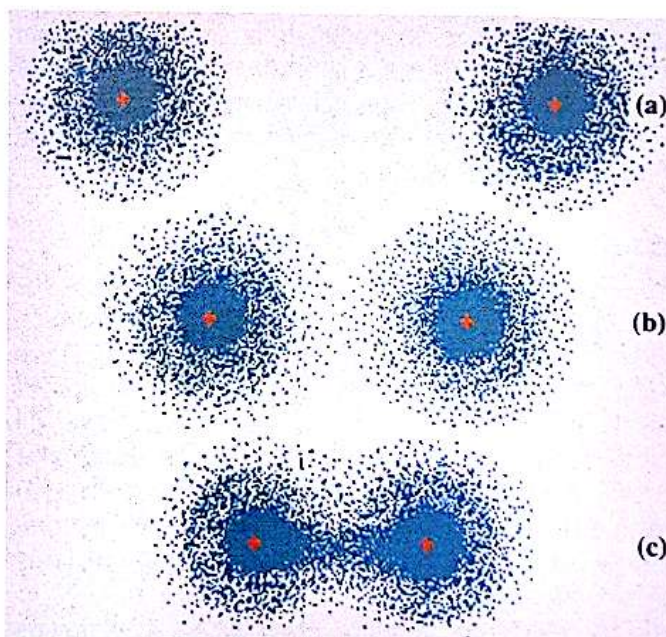
Quand les deux noyaux des deux atomes sont très éloignés l'un de l'autre, c'est l'attraction qui prédomine. Quand ils sont très près l'un de l'autre, la répulsion l'emporte. Il existe une distance pour laquelle répulsion

et attraction s'équilibrent : c'est la distance internucléaire d'équilibre. Dans la molécule de dihydrogène, cette distance est de 74,1 pm (fig. 3).

Les schémas de la figure 4 montrent l'évolution du nuage électronique des deux atomes d'hydrogène au cours de la formation de la liaison.



3. Distance internucléaire d'équilibre.



4. Évolution du nuage électronique au cours de la formation de la liaison.

a. Les deux atomes d'hydrogène, très éloignés l'un de l'autre, n'interagissent pas.

b. Lorsque leur distance diminue, les nuages électroniques sont déformés par les interactions.

c. Dans la molécule de dihydrogène, le nuage électronique est assez dense au voisinage du segment internucléaire, ce qui signifie que la probabilité de présence de deux électrons dans cette région est importante. De façon imagée, on peut dire que les deux électrons négatifs jouent le rôle de ciment entre les deux noyaux positifs; nous retrouvons ainsi l'idée du doublet de liaison.

28.4 la liaison covalente

Le modèle de liaison que nous avons décrit, lors de l'étude de la molécule de dihydrogène, est appelé **liaison covalente**.

Ce modèle fut proposé, en 1916, par les Américains Lewis et Langmuir. Il constitue une première description acceptable de la liaison chimique. Dégageons ses caractéristiques.

- La **liaison covalente** consiste dans la mise en commun par deux atomes d'une ou de plusieurs paires d'électrons, appelées « **doublets de liaison** ».
- Le nombre de doublets qu'un atome partage avec ses voisins s'appelle sa « **covalence** ».
- Chaque atome possède ainsi, en général, le même nombre d'électrons que le gaz noble qui le suit dans la classification périodique.

Appliquons ce modèle à la description de quelques molécules.

28.5 autres molécules diatomiques

Ces molécules ont en commun le fait qu'elles sont nécessairement linéaires. Il suffit donc de déterminer la distance internucléaire d'équilibre, encore appelée *longueur de liaison covalente*, pour décrire parfaitement la géométrie de la molécule.

28.5.1 la molécule de dichlore Cl₂

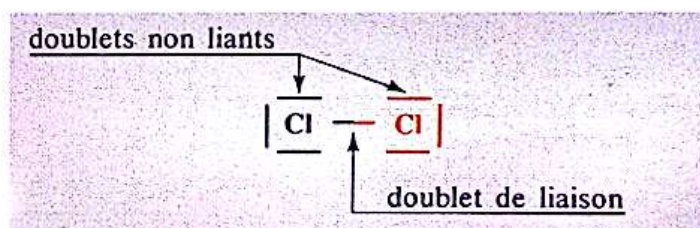
L'atome de chlore ($Z=17$) possède sept électrons périphériques : trois paires d'électrons et un électron isolé ; il lui en manque un seul pour acquérir la structure électronique du gaz rare qui le suit : l'argon. Il peut réaliser ce gain en s'associant à un autre atome de chlore : chacun d'eux apporte son électron isolé pour former un doublet de liaison mis en commun. Chaque atome de chlore possède alors la configuration électronique de l'atome d'argon, qui a sur sa couche externe quatre paires d'électrons.

On a représenté sur la figure 5 la structure électronique externe de la molécule ; chaque doublet d'électrons y est schématisé par un tiret : le doublet *de liaison*, ou doublet de covalence, entre les symboles des deux atomes, les doublets *non liants* autour de ces symboles. Le schéma obtenu constitue la *formule de Lewis* de la molécule.

Nous omettrons souvent la représentation des doublets non liants, et nous écrirons la formule de Lewis simplifiée :



La distance internucléaire dans la molécule de dichlore est de 198,8 pm.

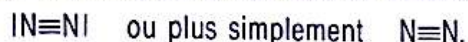


5. Formule de Lewis de la molécule de dichlore.

Remarque : Nous avons vu que les éléments appartenant à la même colonne du tableau de la classification périodique que le chlore constituent avec lui la famille des halogènes : fluor, chlore, brome, iode. Tous donnent des molécules diatomiques semblables à celles du dichlore : F₂, Br₂, I₂.

28.5.2 la molécule de diazote N_2

L'atome d'azote ($Z=7$) possède cinq électrons périphériques; un gain de trois électrons lui permettrait d'acquiescer la configuration électronique du gaz rare qui le suit dans la classification: le néon. Deux atomes d'azote vont donc s'associer et mettre en commun trois doublets électroniques. Nous avons ici un exemple de **triple liaison covalente**. La liaison qui en résulte est très solide et la distance internucléaire très petite: 109,8 pm. La formule de Lewis de la molécule de diazote est:



Remarque: La très grande solidité de la triple liaison rend la molécule de diazote *très peu réactive*.

28.5.3 la molécule de chlorure d'hydrogène HCl

Nous avons remarqué précédemment qu'un gain d'un électron suffisait à l'atome d'hydrogène comme à l'atome de chlore pour acquiescer la structure électronique du gaz rare qui les suit. Le doublet de covalence, qui unit les deux atomes dans la molécule de chlorure d'hydrogène, provient de la mise en commun de l'électron de l'atome d'hydrogène et d'un électron de l'atome de chlore. La formule de Lewis est donc:



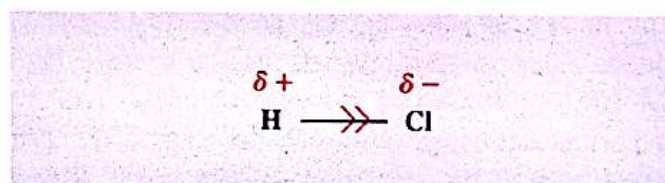
La longueur de la liaison covalente est 127,4 pm.

Remarque: L'atome de chlore a une forte tendance à attirer les électrons (il donne, s'il le peut, naissance à un ion chlorure Cl^-). Ce n'est pas le cas de l'atome d'hydrogène. Le doublet de liaison de la molécule de chlorure d'hydrogène est donc déplacé vers l'atome de chlore: la liaison covalente chlore-hydrogène est dite *polarisée* (fig. 7).

7. La liaison covalente chlore-hydrogène est polarisée. Le doublet de liaison est plus attiré par l'atome de chlore que par celui d'hydrogène. Au point de vue électrique, la molécule est assimilable à un ensemble de deux charges $+\delta$ et $-\delta$. ►



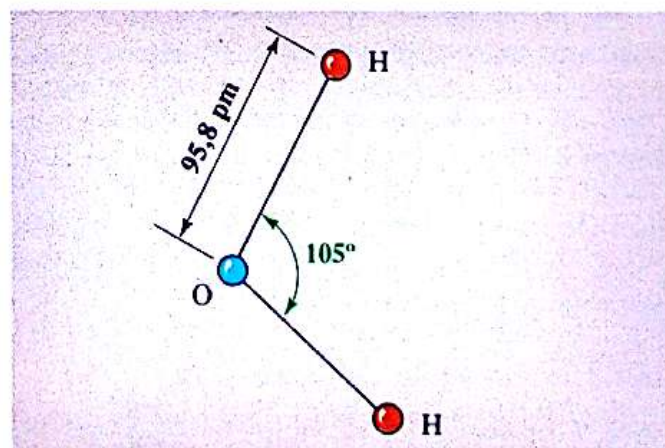
6. Modèle compact (voir document en fin de chapitre) de la molécule de chlorure d'hydrogène.



28.6 la molécule d'eau H_2O

L'atome d'oxygène ($Z=8$) possède six électrons périphériques. En s'associant avec deux atomes d'hydrogène, il gagne deux électrons, et possède donc la structure électronique du néon; chaque atome d'hydrogène a alors la même configuration électronique que l'hélium. L'atome d'oxygène échange donc une liaison covalente simple avec chacun des atomes d'hydrogène.

L'étude stéréochimique de la molécule montre que les trois atomes sont aux sommets d'un triangle isocèle (fig. 8). L'angle \widehat{HOH} vaut 105° et chaque liaison O—H mesure 95,8 pm.



8. Molécule d'eau.

28.7 la molécule d'ammoniac NH_3

Nous avons déjà noté que l'atome d'azote a besoin de trois électrons pour compléter sa couche électronique externe. Dans la molécule de diazote N_2 , ces trois électrons sont fournis par un autre atome d'azote; dans celle d'ammoniac, chacun d'eux est fourni par un atome d'hydrogène. L'atome d'azote échange donc trois liaisons de covalence simple avec les atomes d'hydrogène. La formule de Lewis de la molécule s'en déduit (fig. 9).

La molécule NH_3 ressemble à une pyramide à base triangulaire : l'atome d'azote en occupe le sommet et les trois atomes d'hydrogène forment le triangle équilatéral qui sert de base (fig. 9). La longueur de la liaison N—H est 101,4 pm, l'angle $\widehat{\text{HNN}}$ vaut 107° .

28.8 molécules contenant l'élément carbone

28.8.1 stéréochimie de l'atome de carbone

L'atome de carbone ($Z=6$) a quatre électrons sur sa couche externe. Pour atteindre la configuration électronique du gaz noble qui le suit, le néon, il lui faut échanger quatre liaisons covalentes.

- Lorsque ces quatre liaisons sont échangées avec quatre atomes, l'atome de carbone est dit *tétraédral*. Les quatre voisins de l'atome de carbone se disposent de la manière suivante : l'atome de carbone se trouve au centre d'un tétraèdre dont les sommets sont occupés par les quatre atomes liés au carbone par covalence simple (fig. 10). Le tétraèdre est parfaitement régulier si les quatre atomes sont identiques, plus ou moins déformé dans le cas contraire.

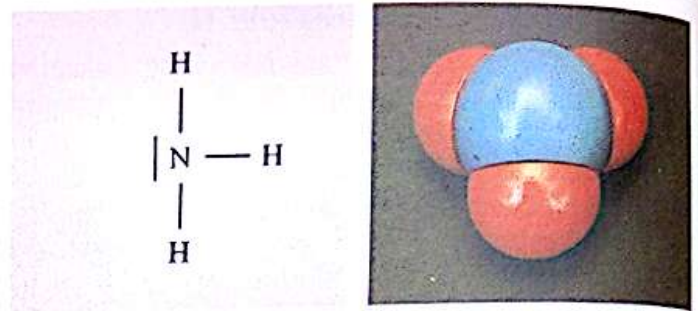
- Lorsque ces quatre liaisons sont échangées avec deux atomes seulement, l'atome de carbone est dit *digonal*. Ses deux voisins se placent alors de part et d'autre de l'atome de carbone, symétriquement si ces deux atomes sont identiques.

28.8.2 la molécule de méthane CH_4

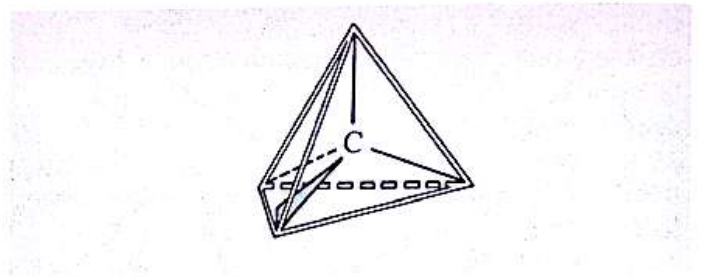
C'est la molécule la plus simple comprenant un atome de carbone tétraédral. Comme le montre la formule de Lewis (fig. 11), l'atome de carbone a la configuration externe du néon, et chaque atome d'hydrogène celle de l'hélium. Les quatre atomes liés à l'atome de carbone étant identiques, la structure tétraédrique est régulière. L'angle $\widehat{\text{HCH}}$ est de $109^\circ 28'$ et la longueur de la liaison covalente simple C—H de 109 pm.

28.8.3 la molécule d'éthane C_2H_6

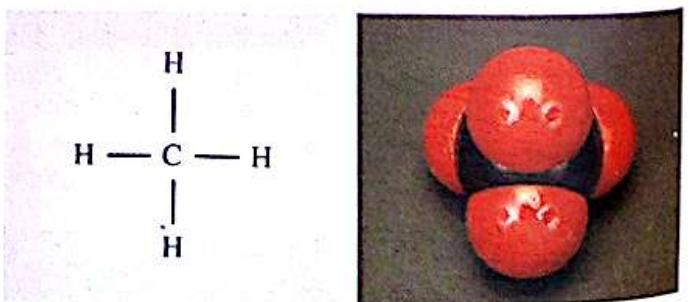
L'éthane représente le 2^e terme d'une série de *carbures d'hydrogène*, appelés *alcane*s, et dont le 1^{er} terme est le méthane. Comme dans la molécule de méthane, chaque



9. Formule de Lewis (à gauche) et modèle moléculaire de l'ammoniac.



10. Stéréochimie d'un atome de carbone tétraédral. Cette géométrie apparaît typiquement dans la structure du diamant (fig. 4, page 270) constitué de carbones tétraédraux liés par covalence.



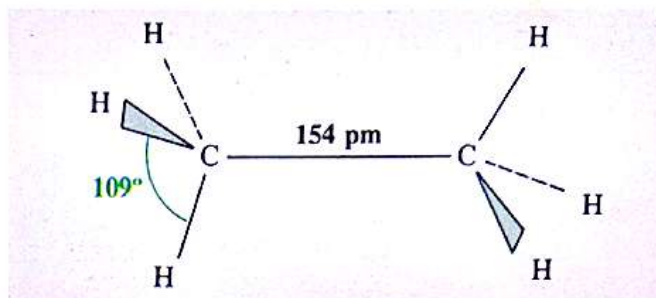
11. Formule de Lewis (à gauche) et modèle moléculaire du méthane.

atome de carbone complète sa couche électronique externe en échangeant quatre liaisons de covalence simple : l'une d'elles est échangée entre les deux atomes de carbone, les trois autres sont des liaisons carbone-hydrogène absolument identiques à celles de la molécule de méthane; leur longueur est en effet la même : 109 pm. La longueur de la liaison simple C—C est de 154 pm. Les angles \widehat{HCH} et \widehat{HCC} sont voisins de 109° . Le schéma de la figure 12 montre la disposition spatiale des atomes.

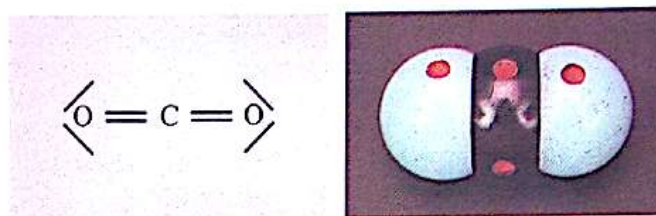
28.8.4 la molécule de dioxyde de carbone CO_2

Nous avons vu, avec l'exemple de la molécule d'eau, que l'atome d'oxygène doit, pour obtenir la structure électronique du gaz noble néon, échanger deux liaisons de covalence. Comme l'atome de carbone doit en échanger quatre, l'association d'un atome de carbone et de deux atomes d'oxygène permet à chacun d'eux d'obtenir la structure électronique du néon.

L'atome de carbone, qui a deux partenaires seulement, est digonal; la molécule CO_2 est donc linéaire. Elle est de plus parfaitement symétrique puisque les deux partenaires sont identiques. La longueur de la liaison covalente double carbone-oxygène est de 116,2 pm.



12. Stéréochimie de la molécule d'éthane.

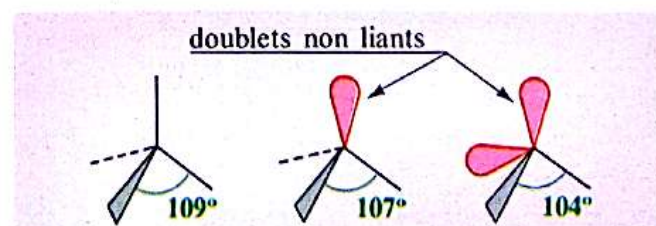


13. Formule de Lewis (à gauche) et modèle moléculaire du dioxyde de carbone.

28.9 pour conclure

Nous pouvons à l'issue de ce chapitre dégager un certain nombre de conclusions :

- Les atomes échangent des liaisons afin d'obtenir une structure électronique plus stable.
- La liaison covalente entre deux atomes consiste en la mise en commun d'un ou de plusieurs doublets d'électrons; le nombre de doublets qu'un atome partage s'appelle sa « covalence ».
- En général, chaque atome possède ainsi le même nombre d'électrons que le gaz noble qui le suit dans la classification périodique.
- La liaison covalente est une « liaison dirigée » : les positions des différentes liaisons qu'échange un atome sont déterminées; les doublets d'électrons, de liaison ou non, s'écartent au maximum les uns des autres (fig. 14).
- La connaissance de la covalence des éléments peut permettre la détermination de la structure électronique d'une molécule et l'établissement de la formule de Lewis. La structure géométrique s'en déduit.



14. Stéréochimie d'un atome à quatre doublets d'électrons. La disposition choisie est celle qui éloigne au maximum les quatre doublets. L'influence du caractère liant ou non liant des doublets est faible.

Application :

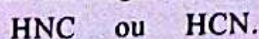
Une molécule a pour formule CNH . Sachant que chaque atome possède la structure du gaz noble qui le suit, établir la formule de Lewis de la molécule.

Chaque atome possédant au sein de la molécule la structure du gaz noble qui le suit, nous pouvons déterminer leur covalence :

— l'hélium suit l'hydrogène dans la classification périodique : la covalence de l'hydrogène est donc 1;

— le néon a un numéro atomique de 10, le carbone de 6, l'azote de 7. La covalence du carbone est donc $(10-6)=4$; celle de l'azote $(10-7)=3$.

L'atome d'hydrogène est donc nécessairement placé à une extrémité de la molécule; deux dispositions sont envisageables :



La première est à éliminer, car si les covalences de l'azote et de l'hydrogène sont satisfaites, celle du carbone ne le sera pas. Seule la seconde convient :



L'atome de carbone, flanqué de deux voisins, est digonal; la molécule est rectiligne.

DOCUMENT

Les modèles moléculaires

Les chimistes utilisent deux types de modèles moléculaires, appelés *modèles éclatés* et *modèles compacts*.

Les modèles éclatés

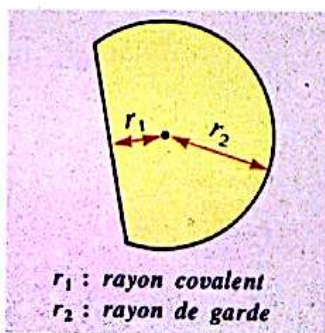
Dans ces modèles, seul le centre de chaque atome est représenté par une petite boule, de couleur différente pour chaque élément. Ces sphères sont reliées les unes aux autres par des tiges dont la longueur est proportionnelle à la longueur des liaisons. Les centres des sphères reproduisent ainsi, à une échelle connue, la disposition des noyaux des atomes dans la molécule. Ces modèles nous donnent donc des renseignements quantitatifs sur l'entourage d'un atome, c'est-à-dire sur le nombre et la nature des atomes auxquels il est lié ainsi que sur les directions dans lesquelles on les trouve.

Ainsi, dans un modèle moléculaire de méthane, on voit que l'atome de carbone est entouré par quatre atomes d'hydrogène équidistants. L'angle valentiel, c'est-à-dire ici l'angle entre deux liaisons C—H, a pour mesure $109^{\circ} 28'$. Or l'expérience montre que, dans toutes les molécules qui contiennent des carbones tétraédriques, les angles entre les liaisons échangées par ces atomes sont très voisins d'angles de 110° . Donc, quelle que soit la molécule à représenter, on peut utiliser un seul type de boules pour représenter les atomes de carbone tétraédriques. De même, dans toutes les molécules qui contiennent un atome d'oxygène échangeant deux liaisons covalentes simples, l'angle entre ces liaisons est toujours voisin de 105° : il en est ainsi dans la molécule d'eau, dans celle de méthanol (CH_3OH).

Les modèles compacts

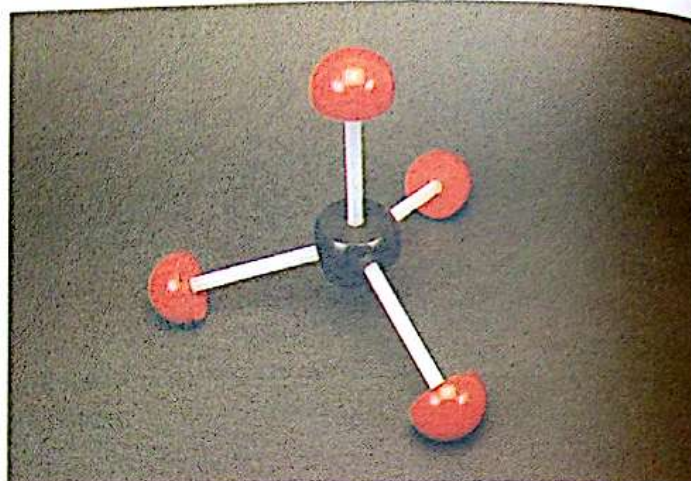
Prenons l'exemple du modèle compact de la molécule de dichlore : il est formé par deux sphères dures accolées par une surface plane. La distance entre les centres des deux sphères représente la longueur de la liaison covalente Cl—Cl, le rayon de chaque sphère étant supérieur à la moitié de cette distance. Chaque sphère est donc caractérisée par deux paramètres géométriques (fig. 18) dont nous allons préciser le sens.

- r_1 représente le **rayon covalent** de l'atome de chlore, c'est-à-dire à la moitié de la longueur de liaison de la molécule Cl_2 . L'intérêt de cette notion de rayon covalent est qu'un atome a un rayon covalent pratiquement constant; on peut donc calculer, à partir des rayons covalents de deux atomes, la longueur de la liaison covalente entre ces deux atomes. L'accord avec les valeurs expérimentales est assez bon, voire très bon (cf. exercices 28.7 et 28.15).

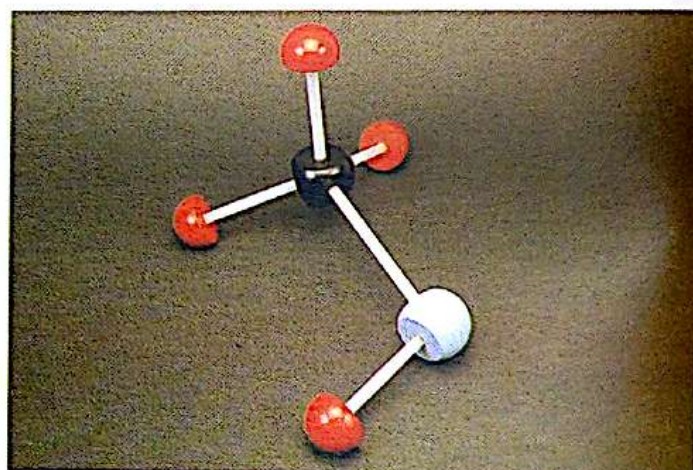


18. Paramètres géométriques d'une sphère d'un modèle compact.

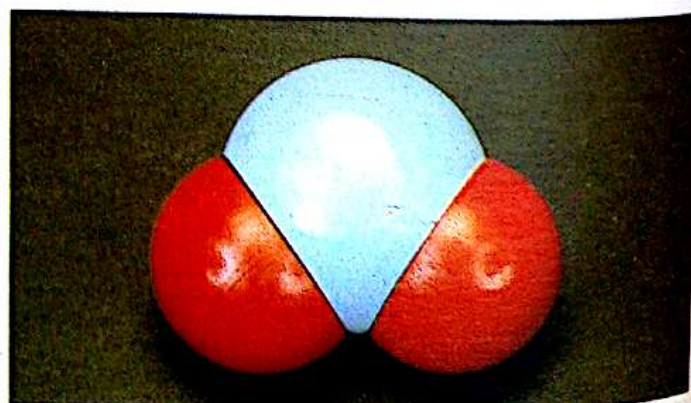
r_1 : rayon covalent;
 r_2 : rayon de garde.



15. Modèle éclaté de la molécule de méthane.



16. Modèle éclaté de la molécule de méthanol.

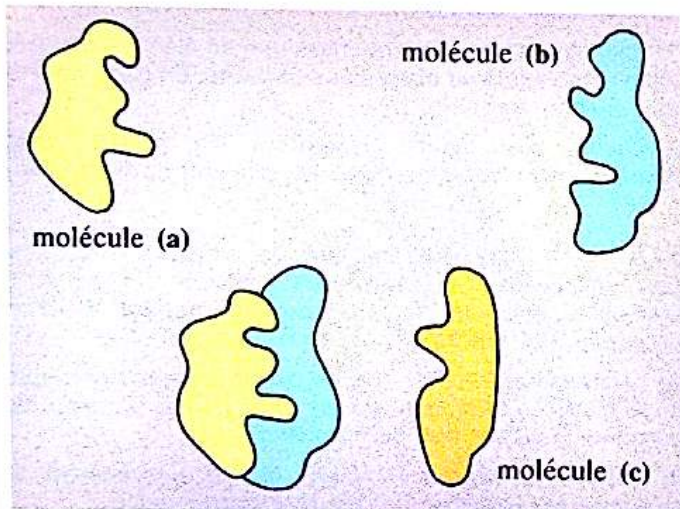


17. Modèle compact de la molécule d'eau.

DOCUMENT

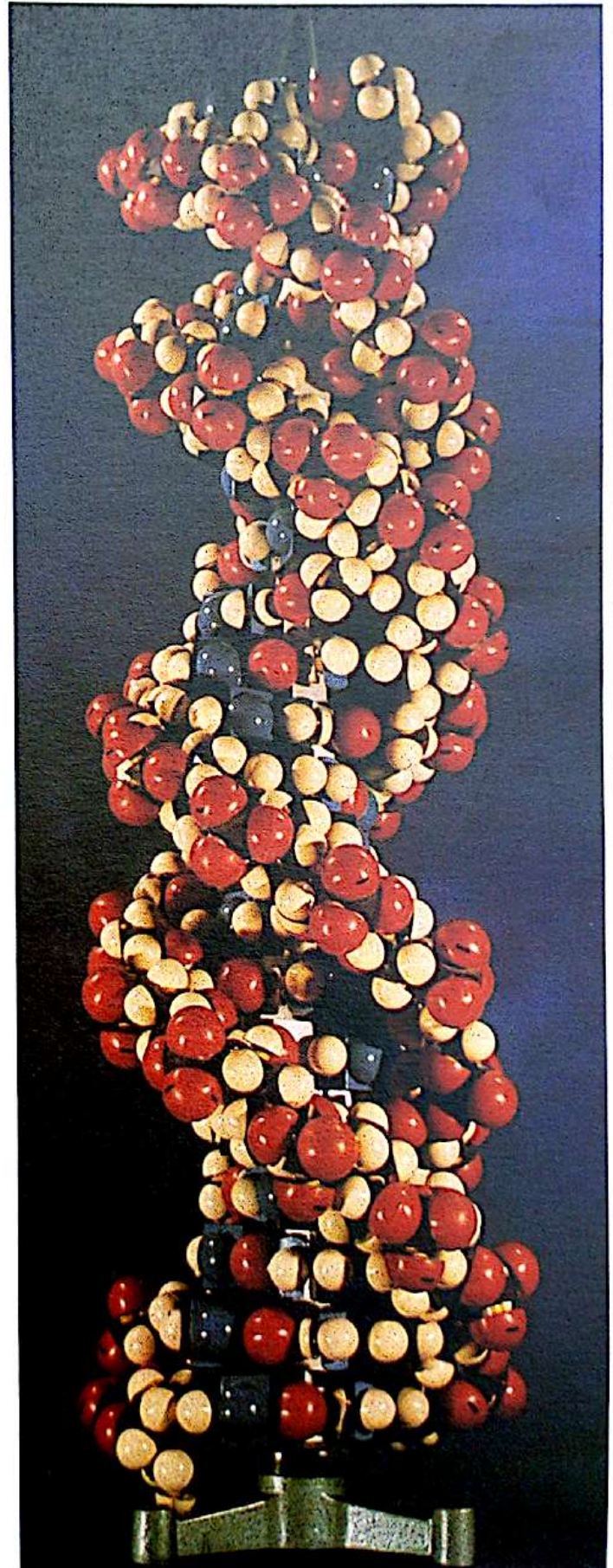
• r_2 représente le **rayon de garde** de l'atome de chlore. Présentons cette notion. Soit un atome d'une molécule de dichlore; il a un partenaire privilégié auquel il est lié par une liaison covalente; il lui permet d'approcher jusqu'à une distance égale à la longueur de la liaison, c'est-à-dire au double du rayon covalent de l'atome de chlore. Par contre, un atome de chlore étranger à cette molécule ne peut s'approcher aussi près : la distance minimale entre les noyaux de deux atomes de chlore non liés est le double du rayon de garde de l'atome de chlore. L'expérience fournit 178 pm comme valeur du rayon de garde de l'atome de chlore.

Un modèle moléculaire compact est donc plus riche en informations qu'un modèle éclaté. En particulier, il donne une idée du *volume* de la molécule. De tels modèles sont très utilisés pour expliquer le déroulement des réactions, chaque fois que la taille des molécules semble jouer un rôle important; c'est souvent le cas pour les réactions des systèmes biologiques (*fig. 19*).



19. Seule la molécule (b), qui possède une forme convenable, peut réagir sur la molécule (a).

20. Un exemple d'association complexe d'atomes : molécule d'acide désoxyribonucléique (ADN). L'ADN est un constituant fondamental des noyaux des cellules vivantes. Il est le substratum chimique du mécanisme de l'hérédité. ▶



Faire le point

- Rappeler la définition d'une molécule; qu'est-ce que l'atomicité d'une molécule?
- Qu'appelle-t-on stéréochimie?
- En quoi consiste une liaison covalente?
- Combien de liaison(s) covalente(s) l'atome de chlore doit-il échanger pour obtenir la structure du gaz noble qui le suit?
- Même question pour l'élément oxygène.
- Qu'appelle-t-on distance internucléaire d'équilibre? Quel est son ordre de grandeur?
- Qu'appelle-t-on doublet liant? doublet non liant? Parmi les molécules étudiées, quelles sont celles qui n'ont aucun doublet non liant?
- Qu'est-ce qu'une liaison covalente double? Citer un exemple.
- Qu'est-ce qu'une liaison covalente triple? Citer un exemple.
- Qu'est-ce qu'une liaison covalente polarisée? Citer des exemples.
- Écrire les formules de Lewis des molécules de dichlore et d'eau. Préciser quels sont les doublets liants et non liants.
- Quelles sont, parmi les molécules étudiées, celles qui correspondent à des corps simples?
- Définir ce qu'est un atome de carbone tétragonal; digonal.
- Qu'est-ce qu'un carbure d'hydrogène?
- Quelle est la formule du méthane? Préciser sa structure géométrique.

28.1 La molécule de tétrafluorure de silicium a pour formule SiF_4 ; chaque atome de fluor n'est lié à l'atome de silicium que par une liaison covalente simple. Chaque atome possède-t-il la structure électronique du gaz rare qui le suit?

28.2 1/ Quelle est la structure électronique de l'élément de numéro atomique $Z=35$? Dans quelle colonne de la classification périodique se trouve-t-il?

2/ Quelle est la formule du corps simple correspondant? Donner son nom et écrire la formule de Lewis correspondante.

28.3 Le soufre, qui suit l'oxygène dans la colonne de la classification périodique, donne avec l'hydrogène un composé appelé sulfure d'hydrogène. En vous reportant à la structure électronique de l'atome de soufre, déterminer la formule la plus simple que l'on peut attribuer au sulfure d'hydrogène. Proposer une géométrie pour sa molécule.

28.4 La méthylamine a pour formule CH_5N . Sachant que chaque atome n'échange que des liaisons covalentes simples et possède la structure électronique du gaz rare qui le suit, établir la formule de Lewis de ce corps. Proposer une structure géométrique.

28.5 Quelle est la quantité de matière contenue dans 64 g de :

dioxygène; ozone O_3 ; dioxyde de soufre SO_2 ; méthane?

28.6 1/ Soient les molécules de difluor et de dihydrogène. Le doublet de liaison est-il équitablement réparti entre les deux atomes de ces molécules?

2/ Quel type d'ions l'élément fluor a-t-il tendance à donner? Même question pour l'élément hydrogène.

3/ Le doublet de liaison est-il équitablement réparti dans la molécule de fluorure d'hydrogène? Comment appelle-t-on une telle liaison?

28.7 1/ Quelle est la formule du composé le plus simple formé uniquement de carbone et de chlore? Écrire la formule de Lewis correspondante.

2/ L'atome de carbone est-il digonal ou tétragonal? Proposer une géométrie pour la molécule.

3/ La longueur de la liaison $\text{C}-\text{Cl}$ est de 176,1 pm. Comparer cette longueur à celle des liaisons $\text{C}-\text{C}$ et $\text{Cl}-\text{Cl}$. Que remarque-t-on?

28.8 La composition d'un corps peut être exprimée sous forme de pourcentage molaire ou massique.

1/ Calculer le pourcentage molaire de l'élément oxygène dans la molécule de dioxyde de carbone. En déduire celui de l'élément carbone.

2/ Calculer le pourcentage massique en élément oxygène dans la molécule de dioxyde de carbone. En déduire celui de l'élément carbone.

3/ Quelle particularité présentent les pourcentages, molaires ou massiques, dans le cas d'un corps simple?

28.9 1/ L'oxyde de carbone est un gaz très toxique. Son pourcentage massique en carbone est de 43 % environ. Déterminer sa composition molaire. Peut-on déterminer sa formule à partir de cette donnée?

2/ La masse molaire de l'oxyde de carbone est inférieure à $50 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$. En déduire la formule de l'oxyde de carbone. Quel est son nom correct?

3/ Étudier la liaison. Chaque atome possède-t-il la structure électronique du gaz rare qui le suit?

28.10 Pourquoi tous les halogènes ont-ils dans leurs différents états physiques la même structure moléculaire que le dichlore?

28.11 1/ Le sélénium (Se) a pour numéro atomique $Z=34$. Déterminer sa structure électronique en utilisant la classification périodique.

2/ Le corps simple sélénium existe sous forme de molécules Se_8 ne comportant que des liaisons covalentes simples. Combien de liaisons simples chaque atome doit-il échanger pour acquérir la structure électronique du gaz qui le suit? Quelle particularité présente nécessairement la molécule Se_8 ?

3/ Si on admet que les angles $\text{Se}-\text{Se}-\text{Se}$ sont voisins de 100° , la molécule Se_8 peut-elle être plane?

28.12 Après le méthane et l'éthane, la série des alcanes se prolonge par le propane C_3H_8 et le butane C_4H_{10} . Donner les formules de Lewis de ces carbures. Est-il possible de prévoir deux structures distinctes correspondant à la formule C_4H_{10} ?

28.13 L'étude des ondes radio venues de l'espace permet de déceler la présence de molécules et même de les identifier. Certaines n'ont jamais été observées sur Terre : c'est le cas de la molécule étudiée.

1/ Elle ne comporte que les éléments carbone, azote et hydrogène. Les pourcentages massiques de carbone et d'hydrogène sont respectivement de 70,6 % et de 2 %. Déterminer sa composition molaire.

2/ Sachant que la molécule ne comporte qu'un seul atome d'hydrogène, établir sa formule.

3/ Sachant que tous les atomes ont la structure du gaz rare qui les suit dans la classification, établir la formule de Lewis de la molécule (il y a une seule solution). Préciser la nature des atomes de carbone (di- ou tétra-gonaux) et en déduire la structure géométrique de la molécule.

28.14 1/ Le phosphore a pour numéro atomique $Z=15$. Quelle est sa structure électronique dans l'état fondamental? Combien de liaisons covalentes simples un atome de phosphore doit-il échanger pour acquérir la structure électronique du gaz noble qui le suit?

2/ Le corps simple phosphore existe sous plusieurs formes. L'une d'elles est constituée de molécules tétra-atomiques P_4 . Les quatre atomes de cette molécule sont exactement semblables. Comment doivent être disposés les quatre atomes pour que cette équivalence soit respectée? (il y a deux solutions).

3/ Dans la molécule P_4 , chaque atome n'échange que des liaisons simples identiques et a la structure électronique du gaz noble qui le suit. Montrer que ces renseignements permettent de choisir entre les deux structures établies en 2/.

28.15 1/ Le rayon covalent d'un atome a été défini dans le document sur les modèles moléculaires. Calculer le rayon covalent de l'atome de chlore.

2/ La longueur de la liaison covalente dans la molécule de dibrome est 228,3 pm. Calculer le rayon covalent de l'atome de brome.

3/ En déduire la longueur de la liaison covalente dans la molécule de chlorure de brome BrCl. Comparer à la valeur expérimentale qui est de 213,8 pm.

Expériences sur le soufre

Équation-bilan d'une réaction



Soufre solide sous divers aspects.



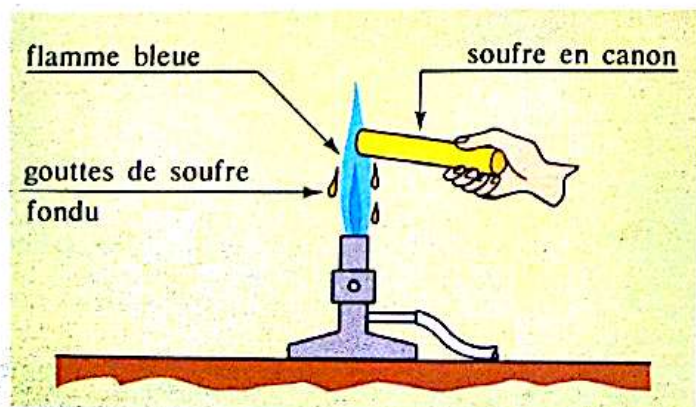
Stockage du soufre à Lacq.

29.1 le corps simple soufre

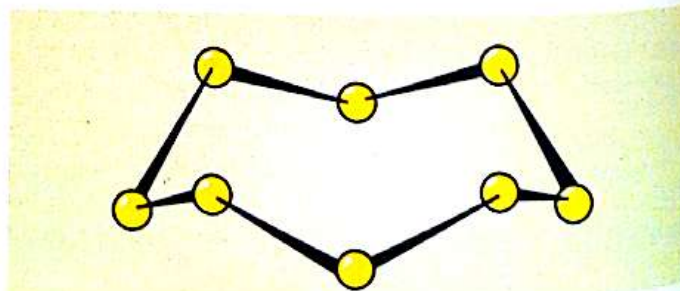
29.1.1 le soufre solide

Le soufre se trouve dans le commerce soit sous forme de blocs cylindriques (*soufre en canon*), soit sous forme d'une poudre formée de microcristaux (*fleur de soufre*). C'est un solide jaune, insoluble dans l'eau et plus dense qu'elle : sa masse volumique est voisine de 2 g.cm^{-3} . C'est un isolant thermique (*fig. 1*) et électrique.

Le soufre est un solide moléculaire : il est constitué de molécules cycliques S_8 (*fig. 2*) d'où son nom de *cyclo-octasoufre*. A l'intérieur d'une molécule, chaque atome de soufre est lié à chacun des deux atomes voisins par une liaison covalente simple. Il acquiert ainsi la structure électronique en octet du gaz noble qui le suit dans la classification : l'argon.



1. Le soufre est un très mauvais conducteur thermique.



2. La molécule de cyclo-octasoufre. Le soufre solide est formé par l'association de molécules cycliques S_8 . La distance S-S est de 212 pm et l'angle \widehat{SSS} de 105° . Comme la plupart des cristaux moléculaires, le cristal de cyclo-octasoufre a une température de fusion assez basse.

29.1.2 effet d'un chauffage

Dans un ballon, chauffons lentement et régulièrement du soufre solide. A 119 °C, le solide fond progressivement en un liquide jaune clair, très fluide. Si l'on poursuit le chauffage, le liquide devient de plus en plus foncé et de moins en moins fluide. Vers 200 °C, le liquide, brun rouge, est si visqueux que l'on peut renverser le ballon sans que le soufre s'écoule. Lorsque la température continue de croître, le liquide retrouve peu à peu sa fluidité tandis que des vapeurs rouges de plus en plus abondantes le surmontent. Le liquide entre en ébullition à 444 °C sous la pression atmosphérique.

Interprétons ces changements d'état.

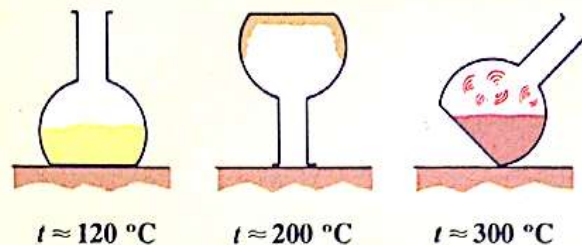
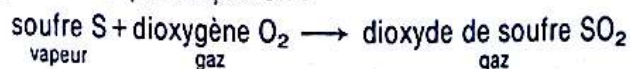
A 119 °C, les molécules S_8 qui composent les cristaux de soufre deviennent libres de rouler les unes sur les autres : c'est la fusion. Lorsque la température s'élève, certaines liaisons S—S se cassent et les cycles S_8 s'ouvrent. L'association des molécules « ouvertes » donne naissance à de longues chaînes; leur enchevêtrement confère au liquide sa grande viscosité. Si la température continue de croître, ces chaînes se brisent en fragments de plus en plus courts et donc de plus en plus mobiles : le liquide redevient fluide. Les vapeurs qu'il émet sont principalement constituées de molécules cycliques S_8 , mais on y trouve aussi des fragments S_6 , S_4 , S_2 .

On le voit, le soufre existe selon les cas sous différentes formes moléculaires : S_8 , S_6 , S_4 , S_2 ... Pour cette raison, et par souci de simplicité, on convient de représenter le corps simple soufre par le symbole S. La masse molaire atomique correspondante est $32,1 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

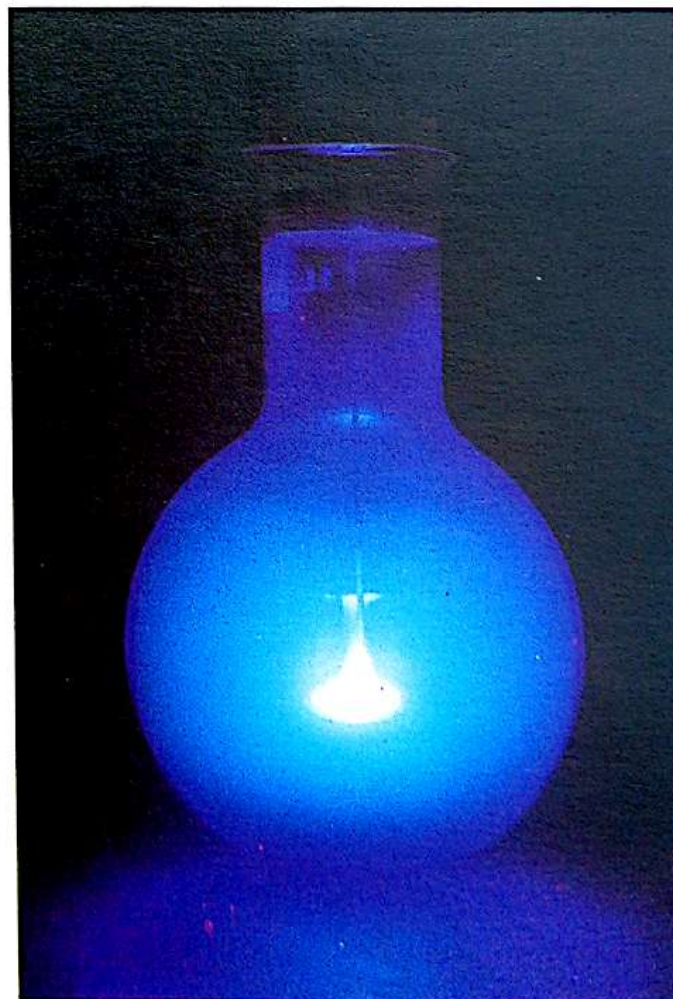
29.2 réaction du soufre sur le dioxygène

Nous disposons d'un flacon rempli de dioxygène O_2 et d'un têt fixé sur un fil de cuivre. Plaçons quelques morceaux de soufre dans le têt et chauffons-les dans la flamme d'un bec Bunsen : le soufre fond, puis émet une vapeur qui s'enflamme à l'air. La flamme courte est bleu pâle; il se dégage un gaz suffocant, incolore, du dioxyde de soufre SO_2 . Plongeons alors rapidement le soufre enflammé dans le flacon de dioxygène : la flamme s'étale beaucoup plus, emplissant le flacon d'une lueur bleue (photo 4). Au bout de peu de temps, la combustion cesse, faute de dioxygène.

Cette réaction est un exemple de réaction entre deux gaz : la vapeur de soufre et le dioxygène. Elle peut être représentée par l'équation :



3. La viscosité du soufre liquide varie beaucoup avec la température.

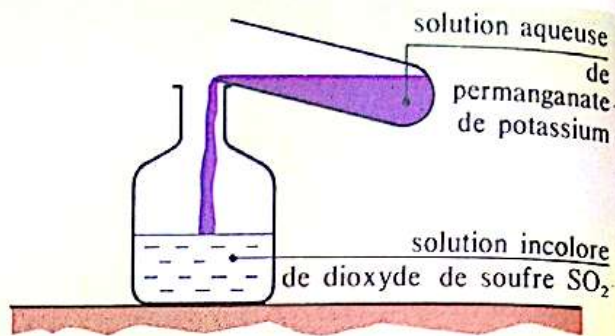


4. Combustion du soufre dans le dioxygène.

Comme toutes les combustions, cette réaction libère de la chaleur : on dit qu'elle est *exothermique*. Une partie de la chaleur sert à fondre et à vaporiser le soufre au fur et à mesure de la réaction. L'autre sert à élever la température des gaz contenus dans le flacon.

Une fois la combustion effectuée, introduisons un peu d'eau dans le flacon et, en le bouchant avec la paume de la main, agitions fortement. Nous sentons un effet de ventouse : la pression régnant à l'intérieur du flacon est donc devenue inférieure à la pression extérieure. Le dioxyde de soufre formé au cours de la combustion est très soluble dans l'eau; sa dissolution, en diminuant le nombre de molécules en phase gazeuse, a donc fait décroître la pression dans le flacon clos. La solution obtenue, incolore, est une solution de dioxyde de soufre dans l'eau. L'une de ses propriétés est de décolorer une solution violette de permanganate de potassium (fig. 5).

Remarque : La réaction de combustion du soufre est très importante sur le plan industriel : son produit, le dioxyde de soufre SO_2 , est à la base de la préparation de l'acide sulfurique H_2SO_4 qui est une des substances les plus utilisées dans l'industrie chimique.



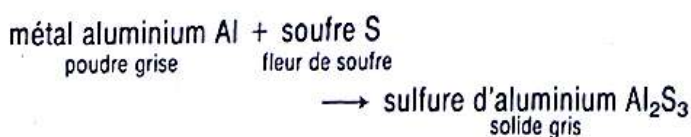
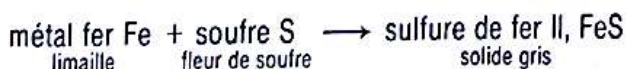
5. La réaction caractéristique du dioxyde de soufre est la décoloration d'une solution violette de permanganate de potassium KMnO_4 . (La coloration violette est due aux ions permanganate MnO_4^- .)

29.3 action du soufre sur les métaux, sulfures

29.3.1 réactions du soufre sur les métaux usuels

Les expériences présentées sur la fiche expérimentale 1 montrent qu'à la température ordinaire, le corps simple soufre est sans action sur des métaux usuels tels que le fer, l'aluminium ou le cuivre. Par contre, une élévation de température permet d'amorcer la réaction qui se poursuit ensuite de manière autonome. La réaction libère de la chaleur, comme le montre l'incandescence observée. Elle fournit un corps nouveau, un sulfure métallique, ayant un aspect et des propriétés très différentes de celles du soufre ou du métal.

Nous pouvons représenter ces différentes transformations par :

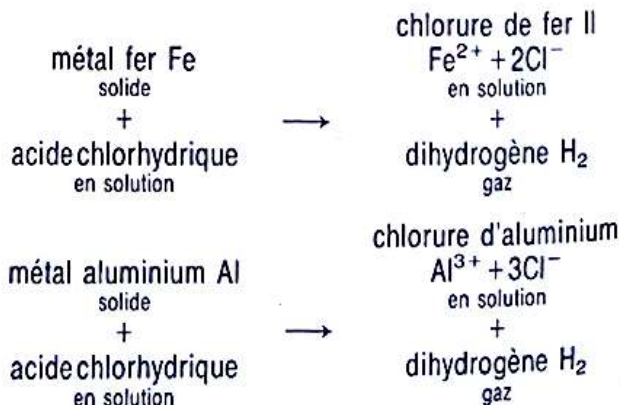


Réalisons à présent quelques expériences pour comparer les propriétés chimiques des substances qui ont réagi, ou *réactifs* : le soufre, le fer, l'aluminium et le cuivre, puis celles des produits des trois réactions précédentes : le sulfure de fer II, le sulfure d'aluminium et le sulfure de cuivre II.

29.3.2 action de l'acide chlorhydrique sur les réactifs

L'acide chlorhydrique est sans action sur le soufre et sur le métal cuivre, même si l'on chauffe (cf. fiche expérimentale 2).

En revanche, l'acide chlorhydrique réagit spontanément sur les métaux fer et aluminium : on observe un dégagement gazeux de dihydrogène H_2 , tandis que le métal passe en solution sous forme de cations fer II Fe^{2+} ou aluminium Al^{3+} .

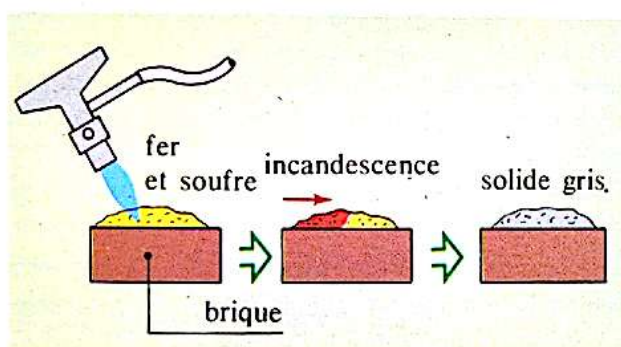


Fiche expérimentale 1

action du soufre sur les métaux

• Expérience 1 : action du soufre sur le fer

Plaçons un mélange intime de limaille de fer et de fleur de soufre (56 g de fer pour 32 g de soufre) sur une brique réfractaire; nous n'observons aucune réaction. Réglons la flamme du bec Bunsen pour obtenir un cône bleu et chauffons une petite portion du mélange. Dès qu'elle devient incandescente, cessons de chauffer. Nous remarquons néanmoins que l'incandescence se propage lentement à travers tout le mélange réactionnel, laissant derrière elle un solide gris, poreux et friable : c'est du sulfure de fer II de formule FeS (fig. 6).



6. Formation du sulfure de fer II.

• Expérience 2 : action du soufre sur l'aluminium

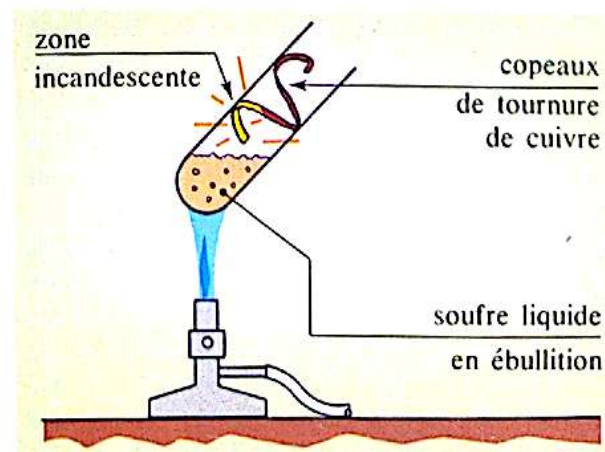
Mélangeons intimement dans un creuset de la poudre d'aluminium et de la fleur de soufre (environ 54 g d'aluminium pour 96 g de soufre) : à froid, il ne se produit aucune réaction. Plaçons un ruban de magnésium dans le mélange et enflammons-le grâce à la flamme bleue du bec Bunsen. Le magnésium brûle à l'air et une très vive réaction se déclenche quand la flamme atteint le mélange : des gerbes d'étincelles, l'émission d'une lumière très blanche démontrent la grande élévation de température (photo 7). Après la réaction, une poudre grisâtre reste dans le creuset : c'est du sulfure d'aluminium, de formule Al_2S_3 .



7. Réaction du soufre sur l'aluminium.

• Expérience 3 : action du soufre sur le cuivre

Dans un tube à essais, plaçons de la fleur de soufre et introduisons des copeaux de tournure de cuivre. Chauffons très fortement : le soufre fond, puis émet des vapeurs et entre en ébullition. Lorsque ces vapeurs atteignent la tournure de cuivre, celle-ci devient incandescente, indice d'une réaction très vive du soufre et du cuivre. Lorsque la réaction est terminée, il reste un solide noir qui recouvre le cuivre non attaqué entièrement; nous pouvons gratter ce solide et recueillir la poudre ainsi obtenue : c'est du sulfure de cuivre II, de formule CuS (fig. 8).



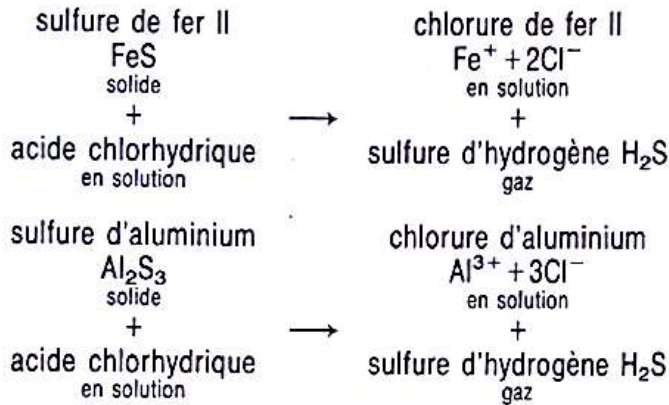
8. Réaction du cuivre sur la vapeur de soufre.

29.3.3 réactions des sulfures

L'eau réagit spontanément sur le sulfure d'aluminium pour donner un dégagement de sulfure d'hydrogène, gaz incolore mais nauséabond et toxique. Ni le sulfure de fer, ni celui de cuivre ne sont attaqués par l'eau.

L'acide chlorhydrique réagit spontanément sur les sulfures d'aluminium et de fer : on observe encore un dégagement de sulfure d'hydrogène. Le sulfure de cuivre reste inattaqué.

Résumons les réactions des sulfures sur l'acide chlorhydrique :



Remarque : Les sulfures métalliques, presque tous insolubles dans l'eau, sont nombreux à l'état naturel et constituent souvent le minerai correspondant. Citons la blende ZnS , la galène PbS , le cinabre HgS , ...

29.4 caractéristiques des réactions étudiées

29.4.1 réactions spontanées et réactions initiées

Pour observer la réaction de l'acide chlorhydrique sur l'aluminium (ou le fer), il suffit de mettre l'acide et le métal en présence : des bulles de dihydrogène se forment rapidement à la surface du métal. De même, dès que l'eau (ou l'acide chlorhydrique) vient au contact du sulfure d'aluminium solide, le dégagement de sulfure d'hydrogène commence. Toutes ces réactions sont des réactions *spontanées*.

Au contraire, ni le fer ni l'aluminium ne réagissent sur le soufre lorsqu'on effectue, à la température ordinaire, les mélanges de soufre et de métal.

Ces mélanges se conservent indéfiniment : la vitesse de formation des sulfures est nulle. Par contre, si on élève la température du mélange, la réaction a lieu : la **vitesse de la réaction croît avec la température**. Le maintien de l'incandescence après l'arrêt du chauffage montre que ces réactions sont exothermiques. La chaleur dégagée par la réaction qui se déroule dans un élément de volume est suffisante pour amorcer la réaction dans l'élément de volume voisin, et ainsi de suite : la réaction se propage

alors de manière autonome dans tout le mélange réactionnel. La chaleur fournie par la flamme du bec Bunsen ou la combustion du ruban de magnésium n'a servi qu'à amorcer — on dit encore *initier* — la réaction.

Nous dirons donc que les réactions du soufre sur le fer et l'aluminium sont des **réactions exothermiques qui nécessitent une initiation thermique**.

29.4.2 influence de l'état physique des réactifs

La réaction entre le soufre et le fer (ou l'aluminium) est une réaction entre solides divisés : nous avons en effet utilisé du soufre en fleur et de la limaille (ou de la poudre). Dans ces conditions, la réaction, une fois initiée, se poursuit jusqu'à épuisement des réactifs.

Par contre la réaction du cuivre sur le soufre est une réaction entre un solide et une vapeur. L'incandescence observée lorsque le copeau de cuivre entre en contact avec la vapeur montre que la réaction dégage de la chaleur. Cependant l'attaque du métal, constitué par un empilement compact d'atomes de cuivre, n'est que superficielle, car la couche de sulfure de cuivre II formée empêche le contact entre le métal et la vapeur, et la réaction cesse.

Nous retiendrons qu'une réaction se déroule d'autant plus facilement que le contact entre les réactifs est plus intime.

29.4.3 réactions impossibles

Nous avons aussi rencontré des réactions *impossibles* : celles de l'acide chlorhydrique sur le soufre, le cuivre et le sulfure de cuivre. L'absence de réaction à la température ordinaire pourrait être attribuée, comme pour les mélanges de fer et de soufre, à une trop faible vitesse de réaction ; mais, comme elle persiste après que l'on ait élevé la température du milieu, nous devons conclure que l'acide chlorhydrique ne peut pas réagir sur le cuivre, le soufre et le sulfure de cuivre. De même l'eau ne peut réagir sur les sulfures de cuivre et de fer.

29.4.4 conclusion

Lorsqu'on met deux espèces chimiques en contact, deux cas peuvent se présenter :

- la réaction est spontanée;
- aucune réaction n'a lieu.

Dans ce dernier cas, il faut encore distinguer plusieurs possibilités :

- une élévation de température provoquée suffit à initier la réaction qui se déroule ensuite de manière autonome, car elle est exothermique;
- un chauffage prolongé permet à la réaction de se dérouler; la réaction absorbe de la chaleur : elle est endothermique;
- aucune réaction ne se produit malgré un chauffage prolongé : la réaction est impossible.

Fiche expérimentale 2

étude des produits des réactions

• Expérience 1 : action de l'acide chlorhydrique sur les réactifs

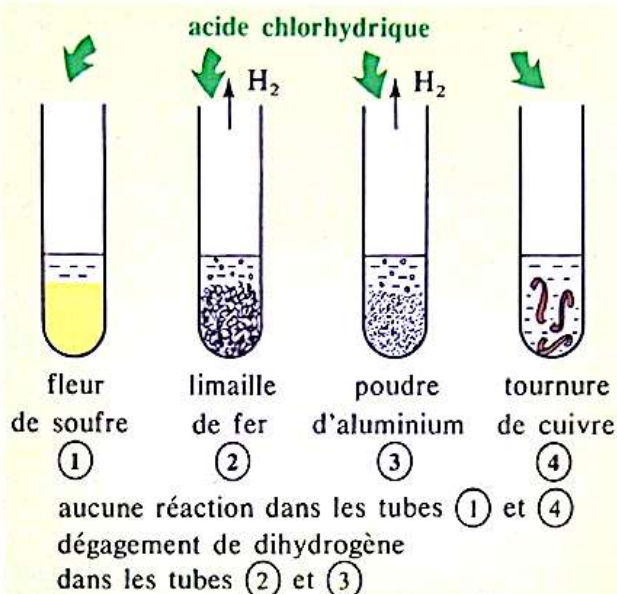
Dans des tubes à essais, mettons de la fleur de soufre (tube 1), de la limaille de fer (tube 2), de la poudre d'aluminium (tube 3) et de la tournure de cuivre (tube 4). Ajoutons dans chacun d'eux un ou deux cm³ d'acide chlorhydrique (fig. 9) :

— Aucune réaction n'a lieu avec la fleur de soufre à la température ordinaire. Il en est de même si on chauffe le mélange : l'acide chlorhydrique est sans action sur le soufre.

— Des bulles de gaz apparaissent sur les grains de limaille; la température de la solution s'élève lentement tandis que le dégagement gazeux s'accélère. Le gaz obtenu, incolore et inodore, brûle avec une petite détonation au contact de la flamme du bec Bunsen : c'est du dihydrogène H₂.

— L'acide chlorhydrique réagit facilement sur la poudre d'aluminium en donnant un dégagement de dihydrogène H₂ tandis que la température de la solution s'élève rapidement. On peut même observer l'ébullition de la solution si on ne prend pas la précaution de refroidir le tube.

— L'acide chlorhydrique ne réagit pas sur le cuivre, ni à froid, ni à chaud.

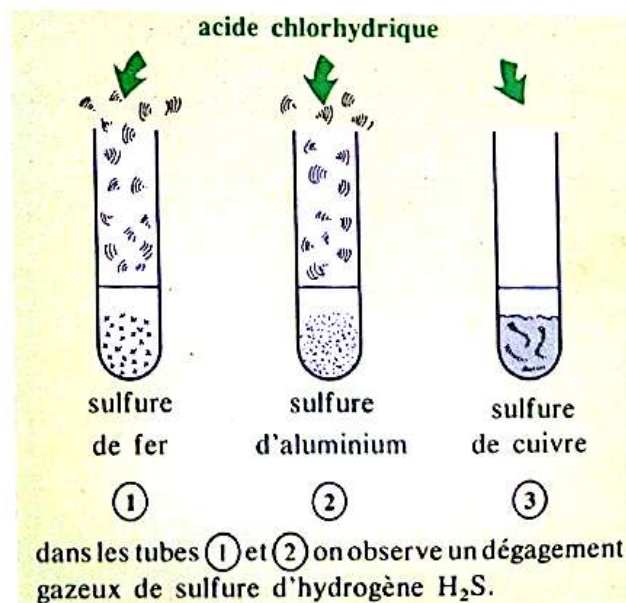


9. Action de l'acide chlorhydrique sur les réactifs.

• Expérience 2 : réactions des sulfures

Plaçons de même dans trois tubes à essais une petite quantité des sulfures obtenus, puis ajoutons de l'eau dans chacun d'eux. Aucune réaction ne se produit dans les tubes contenant les sulfures de cuivre et de fer; par contre, nous observons que le sulfure d'aluminium réagit sur l'eau pour donner un dégagement gazeux. Le gaz obtenu est incolore et nauséabond; son odeur d'œuf pourri permet de le distinguer sans difficulté du dihydrogène : c'est du sulfure d'hydrogène, de formule H₂S. Attention, le sulfure d'hydrogène est un gaz très toxique. Il est inflammable et sa combustion provoque l'apparition de vapeur d'eau et, près de l'orifice du tube à essais, d'un dépôt jaune de soufre.

Ajoutons un peu d'acide chlorhydrique dans deux tubes contenant : l'un du sulfure de fer et l'autre du sulfure de cuivre. Nous observons que le sulfure de fer réagit pour donner un dégagement de sulfure d'hydrogène nauséabond; par contre le sulfure de cuivre ne réagit pas sur la solution d'acide chlorhydrique.



10. Action de l'acide chlorhydrique sur les produits.

29.5 écriture des réactions : équations-bilans

Au cours des réactions chimiques, les corps que l'on met en présence, les réactifs, disparaissent en se transformant en de nouvelles espèces chimiques, les produits de la réaction.

Le mécanisme de la réaction, c'est-à-dire ce qui se passe au cours de la réaction à l'échelle moléculaire est difficile à connaître; aussi nous nous contenterons d'établir un bilan de la réaction. Un tel bilan ne préjuge en rien du mécanisme exact de la réaction.

Pour cela, nous écrivons l'équation-bilan de la réaction.

Dans le premier membre de cette équation, nous écrivons les formules des réactifs et, dans le second membre, les formules des produits de la réaction; les deux membres sont séparés par une flèche, \longrightarrow , qui se lit *donne*.

Il faut ensuite respecter le Principe de conservation des éléments :

- Au cours d'une réaction chimique, les atomes des différents éléments se conservent; on les retrouve, combinés différemment, dans les composés obtenus.

Ainsi tous les atomes figurant dans le premier membre de l'équation doivent se trouver, en nombre égal, dans le second membre. Pour cela, on est amené à placer devant la formule des corps figurant au premier ou au second membre de l'équation chimique des coefficients appelés *coefficients stœchiométriques*.

29.6 signification d'une équation chimique

L'équation-bilan d'une réaction chimique traduit des relations de proportionnalité entre les nombres de moles des différents corps purs intervenant dans la réaction : il s'agit donc avant tout d'un bilan molaire, c'est-à-dire de quantité de matière. Mais, comme chacune de ces moles correspond à une masse (masse molaire), l'équation donnera aussi les proportions en masse des substances correspondantes.

29.6.1 exemple 1 : action du soufre sur l'aluminium

L'action du soufre sur l'aluminium donne du sulfure d'aluminium Al_2S_3 . L'équation-bilan de la réaction est :



La conservation des atomes d'aluminium impose la présence d'un coefficient 2, et la conservation des atomes de soufre impose le coefficient 3.

Les masses molaires des différents corps sont :

$$Al : 27,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}; \quad S : 32,1 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1};$$

$$Al_2S_3 : 150,3 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}.$$

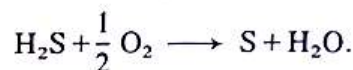
Application 1 :

Écrire l'équation-bilan de la réaction du sulfure d'hydrogène sur le dioxygène.

Nous avons vu (cf. fiche expérimentale 2) que cette réaction fournit un dépôt de soufre et de la vapeur d'eau. Un bilan qualitatif peut être écrit grâce aux formules des différents corps :



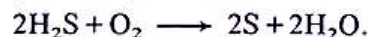
Telle qu'elle est, l'équation ne respecte pas la conservation des atomes de l'élément oxygène. Assurons cette conservation en introduisant un facteur $1/2$ devant le symbole O_2 . L'équation devient :



Remarque : On peut bien sûr multiplier tous les coefficients par un même nombre. Ainsi le bilan de la réaction précédente peut être écrit :

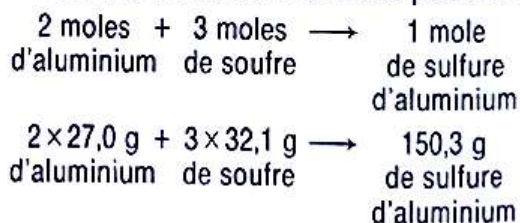


Mais on utilise souvent les coefficients entiers les plus petits possibles, soit ici :

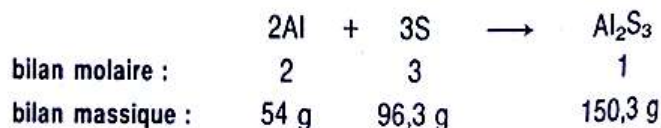


11. A Lacq, la production de soufre à partir d' H_2S utilise la réaction d'oxydation. La réaction est si exothermique que le soufre est obtenu à l'état liquide.

Nous traduisons le bilan d'abord en moles puis en masses :



Ce que l'on peut résumer par :



Cet exemple montre que les corps réagissent dans des proportions définies (proportions stœchiométriques).

29.6.2 exemple 2 : grillage des pyrites de fer

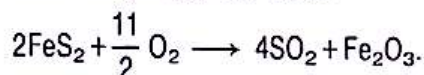
Les pyrites de fer sont constituées par un sulfure de fer FeS_2 différent du sulfure obtenu précédemment, qui avait comme formule FeS . Elles sont abondantes à l'état naturel, et elles sont encore utilisées dans la préparation du dioxyde de soufre SO_2 destiné à la fabrication de l'acide sulfurique. A cet effet, les pyrites sont grillées dans un courant d'air. Elle réagissent sur le dioxygène de l'air pour donner du dioxyde de soufre et de l'oxyde de fer III (oxyde ferrique) de formule Fe_2O_3 ; le bilan qualitatif est donc :



Remarquons que le diazote de l'air, qui ne participe pas à la réaction, ne figure pas dans l'équation-bilan.

Déterminons les coefficients. Dans Fe_2O_3 , il y a 2 atomes de fer; il faut donc 2 atomes de fer dans les composés du premier membre, d'où 2FeS_2 , ce qui donne 4 atomes de soufre que nous retrouverons dans 4SO_2 ; cela exige au total : $4 \times 2 + 3$, soit 11 atomes d'oxygène.

L'équation-bilan du grillage est alors :



Si on préfère ne pas utiliser de coefficients fractionnaires, on écrira :



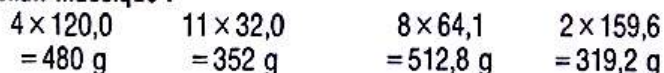
bilan molaire :



masses molaires :



bilan massique :



Remarque : On notera qu'un coefficient stoechiométrique fractionnaire, tel que $1/2$ par exemple, qui a un sens pour exprimer un bilan molaire, serait évidemment dépourvu de signification au niveau microscopique.

29.7 conservation des éléments loi de Lavoisier

Lavoisier avait montré, en 1777, que dans un système isolé chimiquement du milieu extérieur, la masse de l'ensemble du système ne variait pas au cours d'une réaction chimique.

- Dans un système qui n'emprunte ni ne cède aucune substance au milieu extérieur, la masse totale reste constante, quelles que soient les transformations chimiques affectant les constituants du système.

Cette loi ne fait que traduire en termes de masse le Principe de conservation des éléments.

Application 2 :

Quelle masse d'aluminium doit-on utiliser afin d'obtenir 12 g de sulfure d'aluminium?

Utilisons le bilan massique et le tableau de proportionnalité suivant :

sulfure d'aluminium	150,3 g	12 g
aluminium	54 g	x

La masse d'aluminium est telle que :

$$\frac{54}{150,3} = \frac{x}{12}$$

soit : $x = \frac{54 \times 12}{150,3} = 4,3 \text{ g.}$

Application 3 :

On grille 10 tonnes de pyrites de fer FeS_2 supposées pures; quelle masse de dioxyde de soufre obtient-on?

Il est plus simple de raisonner en quantité de matière : 10 tonnes de pyrites contiennent 10^7 g ou $10^7/120$ moles de pyrites, ce qui donne, d'après les proportions en moles,

$$\frac{10^7}{120} \times 2 \text{ moles de SO}_2$$

et, par conséquent, une masse de

$$\frac{10^7 \times 2}{120} \times 64,1 \text{ g} = \frac{128,2}{120} \cdot 10^7 \text{ g,}$$

soit 10,68 tonnes de dioxyde de soufre.



12. Cristal de pyrite de fer.

L'analyse de l'air par Lavoisier

Antoine Laurent de Lavoisier est né à Paris en 1743. Fils d'un homme de loi, il fait ses études au collège des Quatre-Nations où il étudie les humanités puis la physique et les mathématiques. Adjoint à la Ferme Générale chargée du recouvrement des impôts, il a de gros revenus qui lui permettent de disposer, pour ses activités scientifiques, d'un laboratoire bien équipé.

Il s'intéresse principalement à la Chimie mais présente aussi à l'Académie des Sciences des communications de Physique ou d'Économie. Pendant la Révolution, il contribue à l'établissement du Système métrique. Il est guillotiné sous la Terreur, en 1794. L'une de ses plus célèbres expériences est celle de 1774. Voici son compte-rendu.

« J'ai allumé le feu dans le fourneau et je l'ai entretenu presque continuellement pendant douze jours de manière que le mercure fût échauffé jusqu'au degré nécessaire pour le faire bouillir.

« Il ne s'est rien passé de remarquable pendant tout le premier jour : le mercure, quoique non bouillant, était dans un état d'évaporation continuelle; il tapissait l'intérieur des vaisseaux de gouttelettes, d'abord très fines, qui allaient ensuite en augmentant, et qui, lorsqu'elles avaient acquis un certain volume, retombaient d'elles-mêmes au fond du vase et se réunissaient au reste du mercure. Le second jour, j'ai commencé à voir nager sur la surface du mercure de petites parcelles rouges, qui, pendant quatre ou cinq jours, ont augmenté en nombre et en volume, après quoi elles ont cessé de grossir et sont restées absolument dans le même état. Au bout de douze jours, voyant que la calcination du mercure ne faisait plus aucun progrès, j'ai éteint le feu et j'ai laissé refroidir les vaisseaux.

« L'air restant n'était plus propre à la respiration ni à la combustion; car les animaux qu'on y introduisait y périssaient en peu d'instants, et les lumières s'y éteignaient sur-le-champ, comme si on les eût plongées dans de l'eau.

« D'un autre côté, j'ai pris les 45 grains (2,38 g) de matière rouge qui s'était formée pendant l'opération, je les ai introduits dans une très petite cornue de verre, à laquelle était adapté un appareil propre à recevoir les produits liquides et aériformes qui pourraient se séparer; ayant allumé du feu dans le fourneau, j'ai observé qu'à mesure que la matière rouge était échauffée la couleur augmentait d'intensité. Lorsque ensuite la cornue a approché de l'incandescence, la matière rouge a commencé à perdre peu à peu de son volume, et en quelques minutes elle a entièrement disparu; en même temps il s'est condensé dans le petit récipient 41 grains 1/2 (2,19 g) de mercure coulant, et il a passé sous la cloche 7 à 8 pouces cubiques (0,15 l) d'un fluide élastique beaucoup plus propre que l'air de l'atmosphère à entretenir la combustion et la respiration des animaux.

« Ayant fait passer une portion de cet air dans un tube de verre d'un pouce de diamètre, et y ayant plongé une bougie, elle y répandait un éclat éblouissant; le charbon au lieu de s'y consumer paisiblement comme dans l'air ordinaire, y brûlait avec flamme et une sorte de décrépitation, à la manière du phosphore, et avec une vivacité de lumière que les yeux avaient peine à supporter. »

Voici sa conclusion :

« En réfléchissant sur les circonstances de cette expérience, on voit que le mercure, en se calcinant, absorbe la partie salubre et respirable de l'air, ou, pour parler d'une manière plus rigoureuse, la base de cette partie respirable; que la portion d'air qui reste est une espèce de molette, incapable d'entretenir la combustion



et la respiration : l'air de l'atmosphère est donc composé de deux fluides élastiques de nature différente et pour ainsi dire opposée.

« Une preuve de cette importante vérité, c'est qu'en recombinaison les deux fluides élastiques qu'on a ainsi obtenus séparément..., on reforme de l'air, en tout semblable à celui de l'atmosphère, et qui est propre, à peu près au même degré, à la combustion, à la calcination des métaux et à la respiration des animaux. »

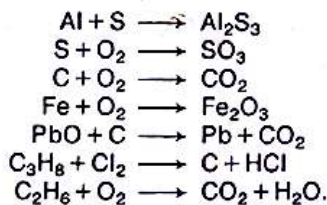
Quelques questions

- Quelle est la nature chimique de l'« air » — c'est-à-dire du gaz — obtenu par décomposition de la « matière rouge »? Quelle est la nature chimique de cette « matière rouge »?
- Quelle nom les chimistes modernes donneraient-ils à la « calcination » du mercure? Écrire l'équation-bilan de la réaction correspondante. Pourquoi la quantité de « matière rouge » cesse-t-elle de croître au bout de quelques jours?
- En recherchant la température d'ébullition du mercure, évaluer la température à laquelle se déroule sa « calcination ».
- Quelle est la nature chimique de l'« air » restant dans l'appareil à la fin de la « calcination » du mercure?
- Écrire l'équation-bilan de la réaction qui se déroule dans la deuxième partie de l'expérience. Sachant qu'un « grain » (une des unités de masse de l'Ancien Régime) équivaut à 0,053 g, calculer la quantité de « matière rouge » qu'a utilisée Lavoisier. Quelle masse (exprimée en « grains ») de mercure doit-il recueillir?

Faire le point

- Quelle est la définition d'une réaction chimique?
- Comparer les caractéristiques d'une réaction chimique et d'une transformation physique.
- Quelle est la partie des atomes qui subit des modifications au cours d'une réaction chimique?
- Quelle est la structure électronique de l'atome de soufre dans l'état fondamental? Quel type d'ions l'élément soufre a-t-il tendance à donner?
- A quel type de cristal appartient le cristal de soufre? Que peut-on en déduire concernant les propriétés électriques (conducteur ou non), mécaniques (dur ou non) et thermiques (température de fusion élevée ou non)?
- Pourquoi utilise-t-on des réactifs solides à l'état divisé?
- Qu'est-ce qu'une réaction que l'on initie?
- Écrire les équations-bilans des réactions sur le soufre des trois métaux étudiés.
- Que donne l'action de l'acide chlorhydrique sur les sulfures de fer, de cuivre et d'aluminium?
- Décrire l'action du dioxygène sur le soufre. Écrire l'équation-bilan de la réaction. Quel est l'intérêt industriel de cette réaction?
- Parmi les réactions étudiées, quelles sont les réactions qui sont exothermiques? spontanées?
- Établir l'équation-bilan de la réaction du sulfure d'hydrogène sur le dioxygène.
- Qu'est-ce que des proportions stœchiométriques?

29.1 Équilibrer les équations-bilans des réactions chimiques suivantes :



29.2 Écrire les équations-bilans des réactions suivantes :

- sodium + dichlore;
- dibrome + aluminium (le produit obtenu est du bromure d'aluminium AlBr_3);
- sodium + eau;
- fer + dichlore (le produit obtenu est le chlorure de fer III).

29.3 Quelle masse minimale de fleur de soufre faut-il mélanger à 4,2 g de limaille de fer pour obtenir un mélange stœchiométrique, c'est-à-dire réalisé dans les proportions de la réaction? Quelle masse de sulfure de fer II obtient-on?

29.4 1/ La fabrication de l'acide sulfurique H_2SO_4 nécessite le passage du dioxyde de soufre au trioxyde de soufre. Écrire les équations-bilans des réactions qui conduisent au trioxyde de soufre, puis à l'acide sulfurique.

2/ Les fuels industriels contiennent jusqu'à 4 % en masse d'élément soufre et leur combustion produit donc du dioxyde de soufre, qui est rejeté dans l'atmosphère : on estime à 500 t/jour les rejets de SO_2 dans la seule région parisienne. Ce dioxyde est, plus ou moins rapidement, transformé en acide sulfurique. Quelle masse d'acide sulfurique est ainsi dispersée chaque jour dans l'atmosphère?

29.5 Le principal minerai de mercure est le cinabre HgS . Le chauffage dans un courant d'air du cinabre conduit au dioxyde de soufre et à la vapeur de mercure que l'on condense. Écrire l'équation-bilan de la réaction et calculer la masse de cinabre qu'on doit griller pour obtenir un litre de mercure liquide.

Donnée : la masse volumique du mercure liquide est de $13,6 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

29.6 Le sucre est un composé bien défini : le saccharose de formule $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$. Par chauffage en vase clos, il donne du carbone et de la vapeur d'eau. Écrire l'équation-bilan de la réaction et calculer la masse de carbone obtenue à partir de 48,3 g de sucre.

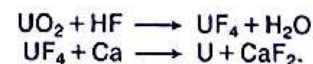
29.7 La flamme d'un bec Bunsen a un aspect différent selon la position de la virole. Comment peut-on expliquer cela? En particulier, pourquoi la flamme devient-elle éclairante et fuligineuse lorsque la virole est trop fermée? Écrire l'équation-bilan de la combustion incomplète du méthane en supposant que tout le carbone reste sous forme de corps simple. Quelle masse de carbone obtient-on à partir de 16 kg de méthane?

29.8 1/ L'aluminium en poudre brûle vivement dans une flamme en donnant un oxyde. En utilisant le fait que le soufre et l'oxygène se trouvent dans la même colonne de la classification périodique, déterminer la formule de l'oxyde d'aluminium et écrire l'équation-bilan de la réaction de combustion.

2/ On réalise un mélange d'oxyde de fer III et de poudre d'aluminium et on amorce la réaction grâce à un ruban de magnésium; une réaction vive se produit et on obtient du fer liquide et de l'oxyde d'aluminium. Écrire l'équation-bilan de la réaction.

Quelle masse d'oxyde de fer et d'aluminium faut-il mélanger pour obtenir 500 g de fer?

29.9 1/ Le métal uranium est préparé à partir de son oxyde UO_2 en deux étapes dont voici les équations non équilibrées :



Équilibrer les deux équations-bilans. Donner le nom de UF_4 .

2/ Quelle masse d'uranium peut-on obtenir à partir de 1 kg d'oxyde d'uranium IV, UO_2 ? Quelles sont les masses de calcium et de fluorure d'hydrogène nécessaires?

Réactions entre gaz

Bilan volumique d'une réaction

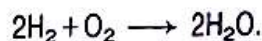
30.1 préparation du dihydrogène au laboratoire

Comme le fer ou l'aluminium, le métal zinc réagit spontanément sur l'acide chlorhydrique pour donner un dégagement de dihydrogène. Cette réaction (voir chapitre 33) permet de préparer de petites quantités de dihydrogène grâce à l'appareil représenté sur la figure 1. Le dihydrogène, très peu soluble dans l'eau, est recueilli dans des éprouvettes retournées sur la cuve à eau.

30.2 réaction du dihydrogène avec le dioxygène

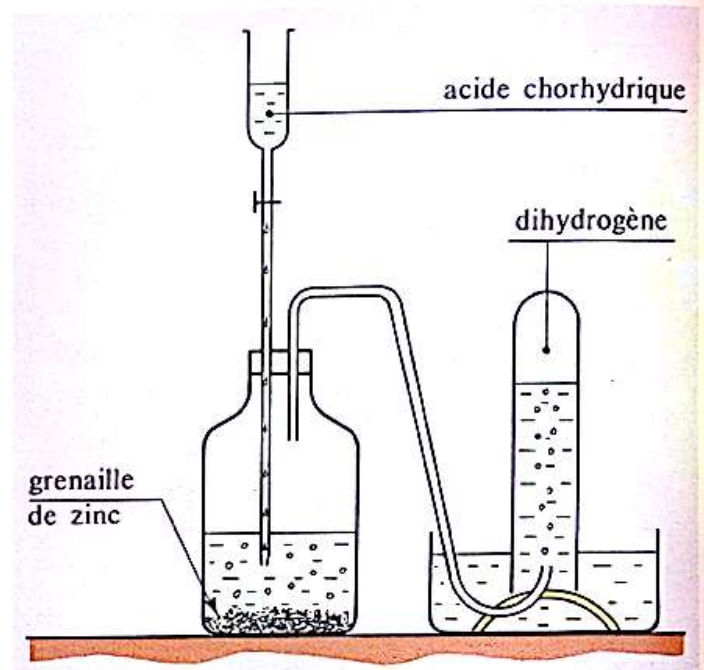
30.2.1 divers modes opératoires

Pour réaliser la réaction, nous avons procédé de diverses manières, décrites sur la fiche expérimentale 1. Mais, quel que soit le mode opératoire choisi, l'équation-bilan est toujours la même :

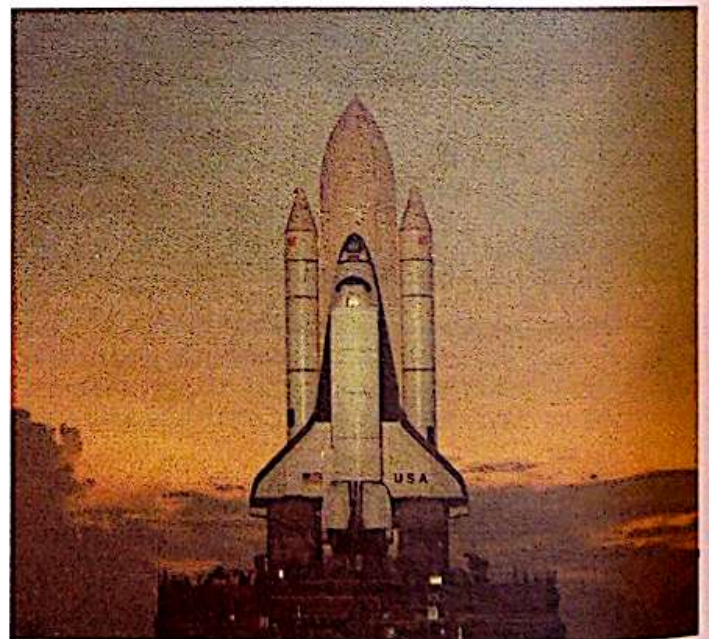


Nous avons ainsi observé :

- l'inflammation puis la combustion d'un courant de dihydrogène dans l'air. Cette combustion est contrôlée par le débit en dihydrogène et n'est donc pas explosive, quoique très exothermique. Elle est utilisée dans le chalumeau oxyhydrique et pour la propulsion des fusées;
- la stabilité des mélanges de dihydrogène et dioxygène à la température ordinaire : la vitesse de formation des molécules d'eau est nulle;
- l'initiation de la réaction lorsqu'on élève la température en un point du mélange. La grande quantité de chaleur, libérée par la réaction qui se déroule au voisinage de ce point, se propage dans tout le mélange et déclenche la réaction qui devient explosive;
- l'effet de la *mousse de platine* : à son contact, la vitesse de la réaction augmente et la formation d'eau a lieu dès la température ordinaire. La mousse de platine est un catalyseur de la réaction. La chaleur libérée par la formation des premières molécules d'eau se propage et provoque une rapide croissance de la vitesse de réaction : le mélange détone.



1. Montage pour la préparation du dihydrogène.



2. On distingue, fixé sous le fuselage de la navette spatiale, un énorme bidon dans lequel sont contenus les 2 millions de litres de dioxygène et de dihydrogène liquides nécessaires à l'alimentation des moteurs principaux de la navette. Son explosion provoqua la catastrophe du 28 janvier 1986.

30.2.2 conclusions

Nous pouvons dégager les caractéristiques essentielles de la réaction de synthèse de l'eau :

- c'est une réaction possible mais non spontanée à la température ordinaire;
- elle peut être déclenchée par une initiation thermique ou par un catalyseur;
- elle est très exothermique.

Généralisons la notion de catalyseur :

- On appelle catalyseur tout corps qui, sans subir de modifications permanentes, augmente la vitesse d'une réaction chimique. Le phénomène global est appelé catalyse.

De nombreuses réactions industrielles utilisent des catalyseurs. Citons par exemple un catalyseur à base de fer utilisé pour la synthèse de l'ammoniac.

Fiche expérimentale 1

réaction du dihydrogène avec le dioxygène

• Expérience 1 : combustion à l'air

Utilisons le montage de la figure 1 et essayons d'enflammer le gaz recueilli au début de l'expérience : présentons pour cela l'orifice de l'éprouvette à la flamme d'un bec Bunsen. Nous constatons que le mélange d'air et de dihydrogène brûle avec une légère détonation.

Renouvelons l'expérience lorsque l'appareil a débité pendant un certain temps : la combustion se fait alors sans détonation. L'air qui emplissait le flacon contenant le zinc et l'acide chlorhydrique a été progressivement remplacé par du dihydrogène qui brûle sans détoner. On dit que l'on a purgé l'appareil de l'air qu'il contenait.

L'équation-bilan de la réaction de combustion est :



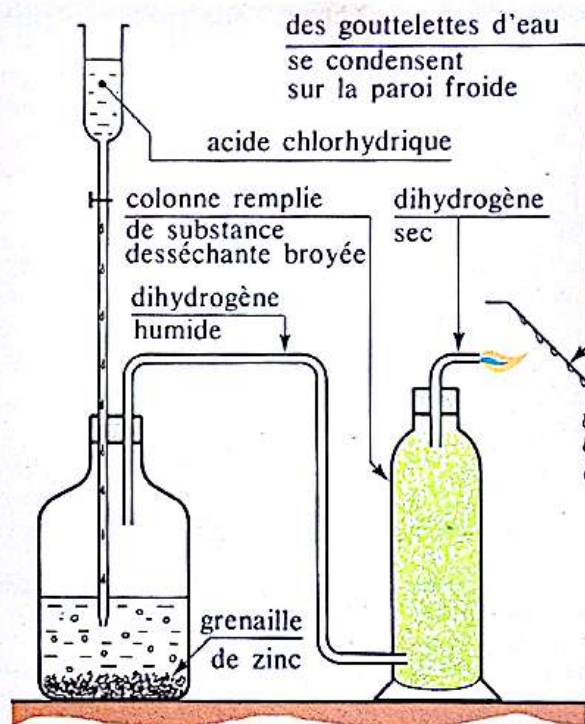
Peut-on mettre en évidence l'eau formée? Il faut pour cela utiliser du dihydrogène sec, donc débarrasser de la vapeur d'eau qu'il contient.

On peut utiliser le dispositif de la figure 3. Enflammons le dihydrogène à la sortie de la colonne desséchante : il brûle avec une flamme pâle, et une soucoupe froide, placée au-dessus de la flamme, permet de condenser la vapeur d'eau formée.

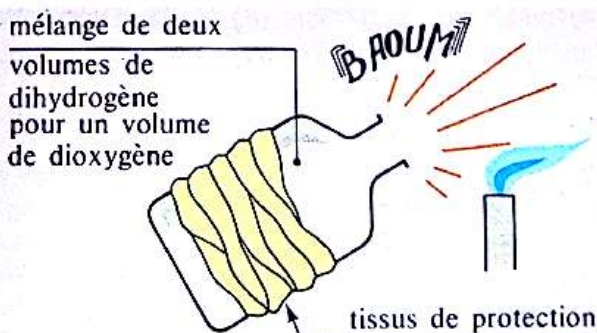
• Expérience 2 : mélanges détonants

Nous avons obtenu de légères détonations en essayant d'enflammer le contenu des premières éprouvettes, c'est-à-dire un mélange d'air et de dihydrogène.

Introduisons dans un flacon de polyéthylène un mélange de dihydrogène et de dioxygène réalisé à partir d'un volume de dihydrogène double de celui de dioxygène. Ce mélange n'est le siège d'aucune réaction chimique apparente et peut se conserver indéfiniment à la température ordinaire. Nous nous trouvons donc à nouveau devant une réaction exothermique, mais dont la vitesse est nulle à la température ordinaire. Nous pouvons initier la réaction en fournissant au mélange une petite quantité d'énergie, par exemple sous forme thermique : approchons l'orifice du flacon de la flamme d'un bec Bunsen; une forte détonation retentit (fig. 4). La réaction, une fois initiée, est pratiquement instantanée.



3. Mise en évidence de la formation d'eau.



4. Mélange détonant. La réaction du dihydrogène avec le dioxygène est explosive. Il faut cependant l'initier. La flamme du bec Bunsen fournit la chaleur nécessaire.

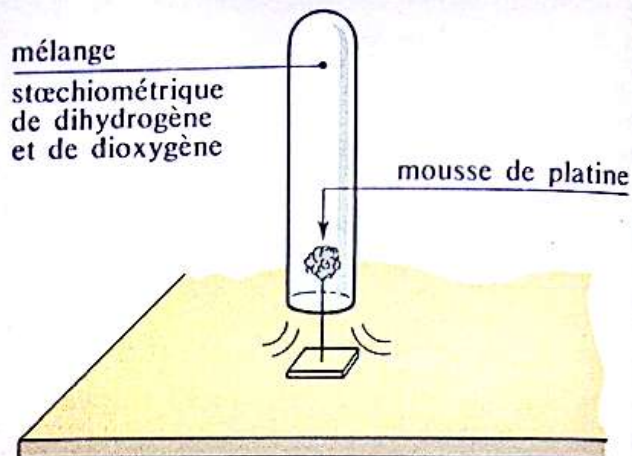
Remarquons que les détonations obtenues en vérifiant la purge de l'appareil montrent que la composition du mélange détonant peut varier dans un intervalle assez large.

• *Expérience 3 : utilisation d'un catalyseur*

Dans une éprouvette contenant un mélange desséché de dioxygène et de dihydrogène, introduisons un peu de mousse de platine (platine spongieux présentant une grande surface de contact). Nous observons une buée qui apparaît sur les parois de l'éprouvette, puis la mousse de platine rougit et, aussitôt, une violente explosion retentit (fig. 5). Cette dernière partie de l'expérience ne nous apprend rien de nouveau : si on élève la température en un point du mélange, la réaction s'amorce et devient explosive. Par contre, nous devons noter qu'il y a eu combinaison à froid du dioxygène et du dihydrogène au contact de la mousse de platine, comme l'atteste l'apparition de buée.

La chaleur dégagée par la réaction qui s'effectue à la surface du platine a été absorbée par celui-ci : la mousse de platine devient incandescente et la réaction se propage, de proche en proche, de plus en plus vite. C'est l'explosion!

Observons la mousse de platine à la fin de l'expérience. Nous constatons qu'elle ne présente aucun signe d'altération. La mousse de platine,



5. Mélange détonant. Grâce au catalyseur, la réaction s'amorce sans apport d'énergie extérieure.

par sa seule présence, a donc rendu rapide à froid une réaction qui, autrement, nécessite pour se déclencher un apport d'énergie sous forme de chaleur. On dit que la mousse de platine est un *catalyseur de la réaction*.

30.3 réaction du dihydrogène avec le dichlore

30.3.1 combustion du dihydrogène dans le dichlore

Un courant de dihydrogène, enflammé dans l'air, continue de brûler dans le dichlore (fig. 6). La réaction, très exothermique, fournit du chlorure d'hydrogène gazeux selon l'équation-bilan :

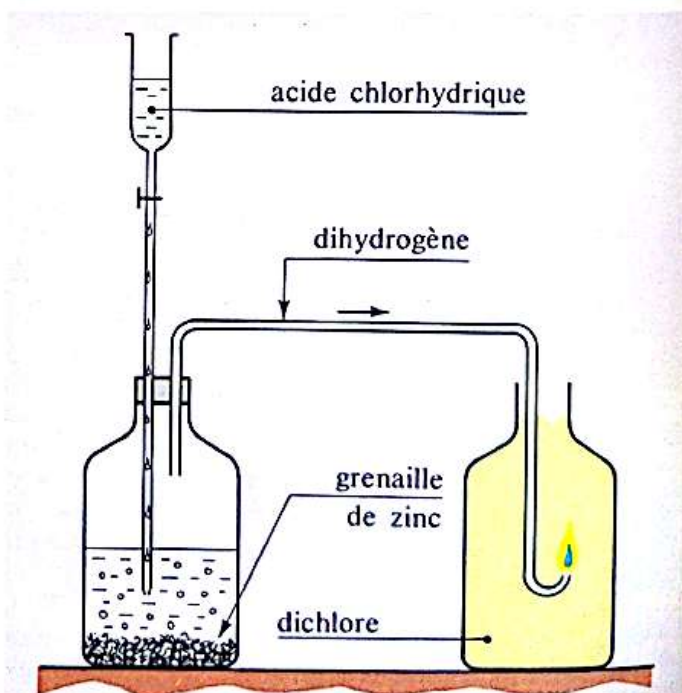


La manière dont nous avons réalisé cette expérience ne nous fournit aucune information sur le caractère, spontané ou non, de la réaction.

30.3.2 mélange détonant

La seconde expérience présentée sur la fiche expérimentale 2 montre qu'à la température ordinaire et en l'absence de lumière vive, les mélanges de dichlore et de dihydrogène n'évoluent pas : la vitesse de la réaction est nulle dans ces conditions. La réaction n'est donc pas spontanée.

Pour que le mélange gazeux entre en réaction, il faut lui fournir une petite quantité d'énergie; l'énergie de l'éclair d'un flash est suffisante pour initier la réaction que son caractère exothermique rend explosive.



6. Combustion du dihydrogène dans un flacon de dichlore.

Fiche expérimentale 2

réaction du dihydrogène avec le dichlore

• Expérience 1 : combustion du dihydrogène dans le dichlore

Adaptons à un appareil producteur de dihydrogène un tube recourbé et recueillons sur la cuve à eau un tube de gaz pour vérifier si l'appareil est purgé d'air. Lorsque le gaz recueilli dans le tube à essais ne détone plus au contact de la flamme du bec Bunsen, nous pouvons admettre qu'il en est bien ainsi. Sortons alors l'extrémité du tube recourbé de la cuve à eau et enflammons le dihydrogène à l'air : il réagit avec le dioxygène de l'air pour

• Expérience 2 : mélange détonant

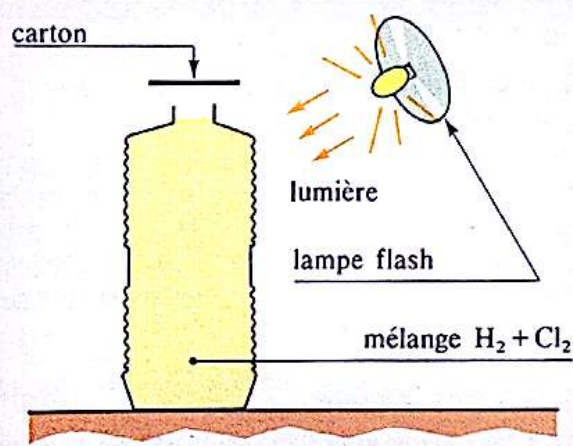
En prenant soin d'opérer à l'abri de la lumière vive, effectuons le mélange, dans une bouteille en polyéthylène, de volumes égaux de dichlore et de dihydrogène. Dans ces conditions, le mélange n'est le siège d'aucune réaction.

Par analogie avec la réaction entre le dioxygène et le dihydrogène, essayons d'amorcer la réaction en fournissant au système une petite quantité d'énergie. Cependant, au lieu d'utiliser l'énergie thermique, c'est-à-dire la chaleur fournie par la combustion du gaz de ville dans la flamme du bec Bunsen, nous adopterons ici une autre forme d'énergie : l'énergie lumineuse.

Essayons donc d'initier la réaction en fournissant au mélange l'énergie lumineuse émise par une lampe de flash de photographe : une violente explosion retentit et la bouteille est déchiquetée (fig. 7). La réaction, une fois initiée, est pratiquement instantanée.

donner de la vapeur d'eau, comme nous l'avons vu précédemment.

Prenons alors un flacon contenant du dichlore dont la présence est décelable par sa couleur verdâtre. Plongeons l'extrémité où brûle le dihydrogène dans le flacon. Nous observons (fig. 6) que le dihydrogène continue à brûler dans le dichlore avec une flamme verte tandis que le gaz contenu dans le flacon perd peu à peu sa coloration verdâtre. Comme toutes les combustions, la réaction libère de la chaleur.



7. Mélange détonant. L'énergie lumineuse permet d'initier la réaction qui devient explosive.

30.4 comparaison des réactions du dihydrogène avec le dioxygène et le dichlore

1. A la température ordinaire et en l'absence de lumière vive, les deux réactions sont possibles mais non spontanées.
2. Les deux réactions sont très exothermiques.
3. Leur vitesse croît quand la température s'élève.
4. L'initiation peut se faire thermiquement dans les deux cas; par contre, seuls les mélanges $H_2 + Cl_2$ sont sensibles à la lumière. En effet, toutes les expériences sur les mélanges $H_2 + O_2$ ont été réalisées en pleine lumière, mais il a fallu la flamme du bec Bunsen ou la présence de mousse de platine pour déclencher la

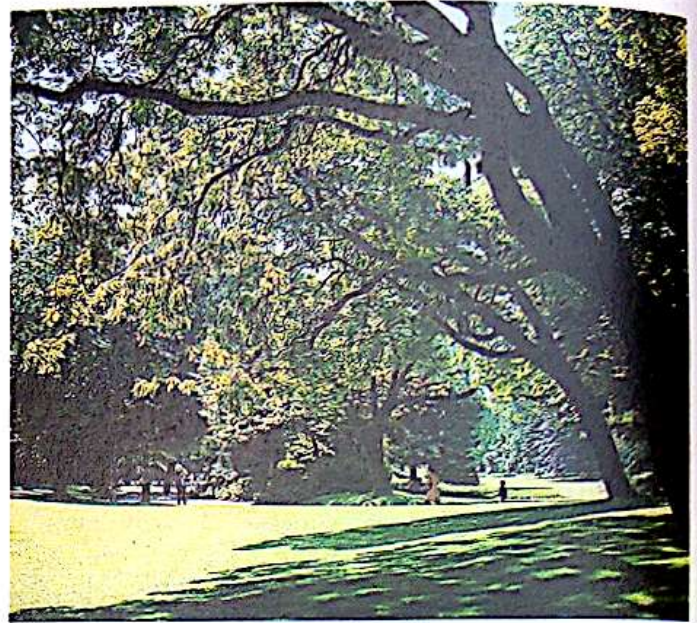
réaction. Nous pouvons donc en déduire que la sensibilité à la lumière des mélanges $H_2 + Cl_2$ est due à la présence du dichlore et non à celle du dihydrogène. Cela est à mettre en relation avec le fait que le dichlore est coloré alors que le dihydrogène et le dioxygène sont incolores. On dit que l'initiation de la réaction du dichlore sur le dihydrogène est photochimique.

Plus généralement :

• On appelle réaction photochimique une réaction chimique dans laquelle la lumière joue un rôle.

5. Les deux réactions se poursuivent spontanément dès qu'elles ont été initiées. Comme elles sont très exothermiques, la température du mélange s'élève et les réactions se déroulent de plus en plus rapidement : les mélanges $H_2 + O_2$ et $H_2 + Cl_2$ sont détonants.

8. La synthèse chlorophyllienne est une réaction photochimique. Elle réalise une véritable purification de l'air puisqu'elle élimine le dioxyde de carbone et libère le dioxygène. Cela justifie la préservation, dans les zones urbaines, de vastes espaces verts permettant de purifier l'air pollué par les trop nombreuses sources de dioxyde de carbone : moteurs à explosion des automobiles, foyers... ▶



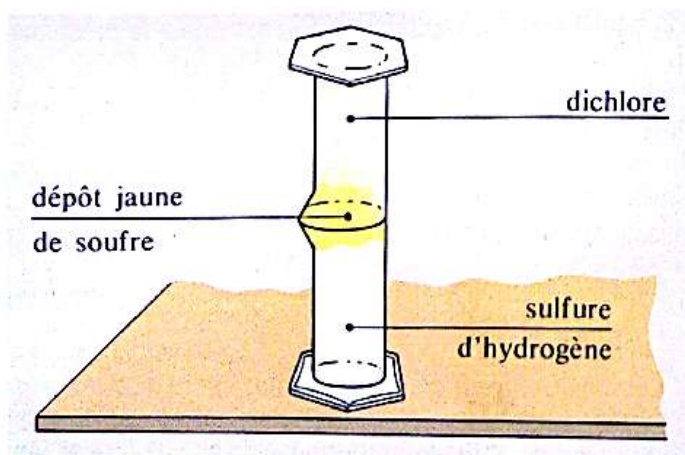
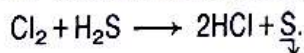
30.5 réaction du dichlore avec le sulfure d'hydrogène

30.5.1 obtention du sulfure d'hydrogène au laboratoire

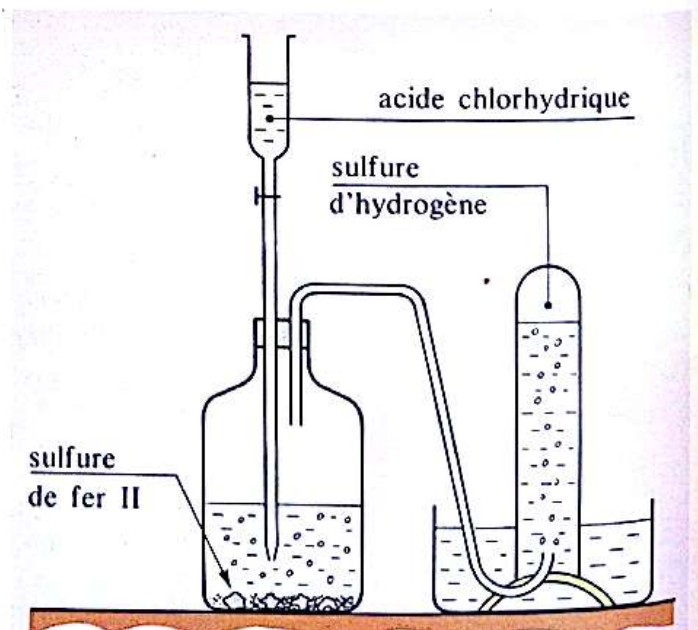
Nous avons étudié, dans le chapitre précédent, la réaction de l'acide chlorhydrique sur le sulfure de fer II qui donne un dégagement de sulfure d'hydrogène H_2S . On peut utiliser cette réaction pour préparer de petites quantités de sulfure d'hydrogène grâce à l'appareil représenté sur la figure 9.

30.5.2 réaction directe

Préparons deux éprouvettes contenant l'une du dichlore, l'autre du sulfure d'hydrogène. Retournons l'éprouvette contenant le dichlore sur celle contenant le sulfure d'hydrogène. Nous observons assez rapidement l'apparition, au voisinage de la zone de contact des deux éprouvettes, d'un dépôt jaunâtre de soufre tandis que la coloration verdâtre du dichlore s'estompe (fig. 10). Nous avons observé une réaction spontanée d'équation-bilan :



10. La réaction du dichlore sur le sulfure d'hydrogène est spontanée.



9. Montage pour la préparation du sulfure d'hydrogène.

30.6 bilan volumique d'une réaction chimique

30.6.1 loi d'Avogadro-Ampère

Nous avons vu, dans le chapitre précédent, comment établir les bilans, molaire et massique, d'une réaction. Cependant, lorsqu'une réaction met en jeu un ou plusieurs composés gazeux, le bilan massique est moins intéressant, car les quantités de gaz sont souvent déterminées par la mesure de leur volume. Nous devons donc nous poser les questions suivantes :

— Quel est le volume occupé par une mole de molécules à l'état gazeux?

— Dépend-il de la nature chimique de ces molécules?

Une hypothèse, émise dès 1811 par Avogadro, apporte la réponse à ces questions :

• Des volumes égaux de gaz différents, pris dans les mêmes conditions de température et de pression, contiennent le même nombre N de molécules.

Il contiennent aussi la même quantité de matière, n , puisque, par définition de la constante d'Avogadro N_A (cf. chapitre 27), n et N sont liés par la relation :

$$N = N_A \cdot n.$$

Considérons un système comportant une mole de molécules (d'après l'hypothèse d'Avogadro, leur nature importe peu) à une température donnée, sous une pression donnée : le volume de ce système est par définition le volume molaire V_m dans les conditions considérées.

La loi d'Avogadro-Ampère, conséquence directe de l'hypothèse précédente, s'énonce ainsi :

• Dans les mêmes conditions de température et de pression, tous les gaz ont la même volume molaire V_m .

30.6.2 volume molaire normal

Notons bien que V_m dépend de la température et de la pression :

— Les gaz étant dilatables, V_m augmente lorsque la température croît, la pression étant maintenue constante.

— Les gaz étant compressibles, V_m diminue lorsque la pression croît, la température étant maintenue constante.

Il convient donc de toujours fixer les conditions de température et de pression du gaz pour donner une valeur du volume molaire V_m .

On dit qu'un système est dans *conditions normales de température et de pression* lorsque sa pression est égale à 1 bar, soit 10^5 Pa (soit environ 1 atmosphère), et sa température à 0°C . Dans ces conditions, le volume molaire est appelé *volume molaire normal*.

• Dans les conditions normales de température et de pression, le volume molaire est de $22,4 \text{ l} \cdot \text{mol}^{-1}$.

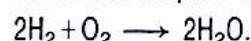
Remarque : La loi d'Avogadro-Ampère est en fait une loi approchée. La donnée du volume molaire normal, $22,4 \text{ l}$, ne comporte qu'un nombre de chiffres qui correspond à cette approximation. Les écarts à la loi affectent essentiellement le deuxième chiffre après la virgule.

30.6.3 établissement de bilans volumiques

La loi d'Avogadro-Ampère nous permet donc d'affirmer qu'à condition que tous les gaz soient placés dans les mêmes conditions de température et de pression, le bilan molaire d'une réaction permet d'établir le bilan volumique de cette réaction et réciproquement. Montrons-le sur quelques exemples.

Exemple 1

La synthèse de l'eau se traduit par l'équation-bilan :



Dans les conditions normales, seuls le dihydrogène et le dioxygène sont gazeux et c'est à ces deux corps seulement que nous pouvons appliquer la loi d'Avogadro-Ampère.

Soient n_{O_2} et n_{H_2} les quantités de matière qui se combinent, V_{O_2} et V_{H_2} les volumes gazeux correspondants avant le mélange.

Le bilan molaire indique :

$$\frac{n_{\text{H}_2}}{n_{\text{O}_2}} = 2.$$

La loi d'Avogadro-Ampère impose alors que :

$$\frac{V_{\text{H}_2}}{V_{\text{O}_2}} = 2,$$

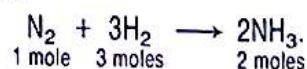
ce qu'on énonce souvent ainsi : 2 « volumes » de dihydrogène se combinent à 1 « volume » de dioxygène.

Ce résultat reste vrai quelle que soit l'unité de volume choisie pour évaluer ces volumes.

Si la température est telle que l'eau soit à l'état de vapeur, nous pourrions ajouter qu'il se forme deux volumes de vapeur d'eau; mais il faut bien alors préciser « vapeur d'eau ».

Exemple 2

La réaction de synthèse du gaz ammoniac se traduit par l'équation-bilan :

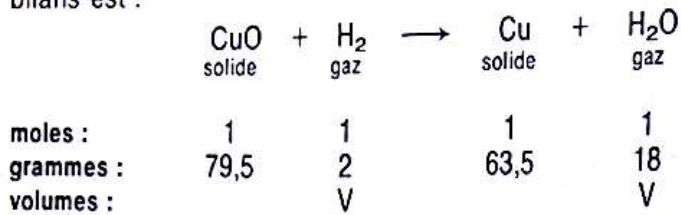


Tous les corps étant des gaz, nous traduisons, en volume : 1 « volume » de diazote se combine à 3 « volumes » de dihydrogène pour donner 2 « volumes » de gaz ammoniac.

Exemple 3

Montrons sur un dernier exemple que les trois bilans — molaire, massique et volumique — d'une équation chimique peuvent être utilisés simultanément.

Le dihydrogène réagit vers 200 °C sur de l'oxyde de cuivre II en donnant du cuivre et de l'eau, sous forme de vapeur. L'équation de la réaction dont nous donnons les bilans est :



Application :

Dans un tube à réduction chauffé, on fait passer un courant de dihydrogène; le tube contient initialement 31,8 g d'oxyde de cuivre II. Quel est le volume de dihydrogène, mesuré dans les conditions normales de température et de pression, nécessaire pour faire disparaître la totalité de l'oxyde de cuivre? Quelle masse de cuivre obtient-on?

Nous calculons la quantité n d'oxyde de cuivre existant dans 31,8 g :

$$n = \frac{31,8}{79,5} = 0,4 \text{ mol.}$$

Il nous faut la même quantité de dihydrogène, 0,4 mol, qui occupe, dans les conditions normales, un volume de :

$$0,4 \times 22,4 = 8,96 \text{ l.}$$

L'équation-bilan montre que, si une mole d'oxyde de cuivre est détruite, il se forme une mole d'atomes de cuivre; la masse de cuivre cherchée est donc :

$$0,4 \times 63,5 = 2,54 \text{ g.}$$

Cet exemple nous montre que l'utilisation du bilan molaire d'une réaction simplifiée au maximum la solution d'une question relative soit aux masses, soit aux volumes.

EXERCICES

Faire le point

- Pourquoi faut-il purger soigneusement l'appareil de production du dihydrogène avant de l'enflammer? Comment peut-on vérifier que l'appareil est purgé?
- Pourquoi la combustion du dihydrogène dans l'air n'est-elle pas explosive? Citer une application de cette réaction?
- Quelle est la définition d'un catalyseur?
- Définir les termes « initiation d'une réaction ». Citer un exemple.
- Pourquoi utilise-t-on de la mousse de platine et non pas un fil de platine?
- Qu'appelle-t-on réaction photochimique?
- Rappeler la définition de la constante d'Avogadro. Quelle est sa valeur?
- Énoncer la loi d'Avogadro-Ampère.
- Quel est l'ordre de grandeur du volume molaire dans les conditions normales de température et de pression?
- Comment varie le volume d'un gaz en fonction de la température? de la pression?

30.1 Dans un flacon, on introduit sur la cuve à eau 250 cm³ de dioxygène mesuré dans les conditions normales de température et de pression. Quel volume de dihydrogène, pris dans les mêmes conditions, faut-il introduire dans le flacon pour obtenir un mélange stœchiométrique? Quelle masse d'eau peut-on former à partir de ce mélange?

30.2 Un eudiomètre est un tube de verre très épais permettant d'étudier des réactions entre gaz. Il est muni de deux électrodes entre lesquelles on peut faire éclater une étincelle. On introduit dans un eudiomètre un volume V de dihydrogène et un volume égal de dioxygène. Après déclenchement de l'étincelle, l'eudiomètre contient de la vapeur d'eau et un gaz. Quelle est la nature de ce gaz? Quel est son volume mesuré dans les mêmes conditions que les volumes des réactifs?

30.3 On veut préparer 0,5 l d'eau liquide. Quels volumes de dihydrogène et de dioxygène faut-il utiliser à 27 °C sous une pression de 1 atm?

Donnée : le volume molaire dans ces conditions est de 24,6 l.mol⁻¹.

30.4 Dans une bouteille en polyéthylène de 1 l, on effectue le mélange de deux volumes égaux de dichlore et de dihydrogène. En présence d'une lumière vive, le mélange détone.

- 1/ Écrire l'équation-bilan de la réaction.
- 2/ Calculer la quantité de chlorure d'hydrogène formé.
- 3/ Quelle est la masse de dichlore utilisée?

Données : dans les conditions de l'expérience, V_m est de $24 \text{ l}\cdot\text{mol}^{-1}$.

30.5 Le chlorure d'hydrogène HCl réagit sur le dioxygène O_2 pour donner de l'eau et du dichlore.

- 1/ Écrire l'équation-bilan de la réaction.
- 2/ Calculer la masse du dichlore obtenu en traitant 1 m^3 de chlorure d'hydrogène (ce volume est mesuré à $200 \text{ }^\circ\text{C}$ et sous 1 atm; V_m est alors de $38,8 \text{ l}\cdot\text{mol}^{-1}$).
- 3/ Quel volume de dioxygène, mesuré dans les mêmes conditions, faut-il utiliser? Quel serait le volume correspondant dans les conditions normales de température et de pression?

30.6 On extrait chaque jour du gisement de Lacq 20 millions de m^3 de gaz naturel, ce volume étant mesuré dans les conditions normales de température et de pression.

- 1/ Dans le gisement, la pression est de 680 bars et la température de $140 \text{ }^\circ\text{C}$. Quel est le volume occupé dans le gisement par le gaz extrait en un jour? Dans les conditions ci-dessus, V_m est de $0,050 \text{ l}\cdot\text{mol}^{-1}$.
- 2/ Le gaz naturel obtenu contient 15,4 % en moles de sulfure d'hydrogène que l'on sépare des autres constituants. On lui fait subir une *oxydation ménagée* par le dioxygène de l'air : on obtient de la vapeur d'eau et du cyclo-octasoufre liquide. Écrire l'équation-bilan de la réaction et calculer la production journalière de soufre en tonnes. (On supposera que l'on transforme tout le sulfure d'hydrogène.)

30.7 Le butane et le propane sont deux alcanes utilisés comme combustibles domestiques. Leur combustion donne du dioxyde de carbone et de l'eau. Leur formule est C_3H_8 pour le propane C_4H_{10} pour le butane.

- 1/ Écrire les équations-bilans des réactions de combustion. Sachant qu'une bouteille de propane contient environ 15 kg de gaz liquéfié, calculer les masses d'eau et de dioxyde de carbone formés lorsqu'on brûle tout le gaz contenu dans la bouteille.
- 2/ Pendant les quatre mois froids de l'année, un abonné consomme 1500 m^3 de gaz (le volume molaire étant voisin de $24 \text{ l}\cdot\text{mol}^{-1}$ dans les conditions d'utilisation). Quelle masse de butane a-t-il brûlé? Quels volumes de dioxyde de carbone et de vapeur d'eau ont été produits? Quel volume d'air a été nécessaire pour assurer la combustion?

30.8 Le méthane constitue la principale source industrielle de dihydrogène. Chauffé en présence de vapeur d'eau, il donne du monoxyde de carbone et du dihydrogène.

- 1/ Écrire l'équation-bilan de la réaction et calculer le nombre de moles de dihydrogène qu'on obtient en traitant 10 millions de m^3 de méthane, le volume étant mesuré dans les conditions normales de température et de pression.
- 2/ Calculer la composition molaire et massique du mélange obtenu. Quelle remarque peut-on faire?

30.9 Porté à haute température en l'absence de dioxygène, le méthane se décompose en carbone et dihydrogène. Quel volume de méthane, mesuré dans les conditions normales de température et de pression, faut-il décomposer pour obtenir 1 tonne de « noir de carbone »? Quel est le volume de dihydrogène obtenu?

30.10 1/ Écrire l'équation-bilan de la réaction de synthèse de l'ammoniac NH_3 . Certaines installations industrielles peuvent fournir 3000 t d'ammoniac par jour. Quelles masses de dihydrogène et de diazote sont nécessaires pour cela?

2/ Peut-on utiliser, pour réaliser cette synthèse, un mélange d'air et de dihydrogène?

3/ Quel est le volume occupé par les masses, calculées ci-dessus, de dihydrogène et de diazote dans les conditions normales de température et de pression? Industriellement, la synthèse s'opère sous 1500 bars et vers $500 \text{ }^\circ\text{C}$; quel est alors le volume occupé par ces gaz? Dans les conditions de la synthèse, V_m est de l'ordre de $0,04 \text{ l}\cdot\text{mol}^{-1}$.

30.11 Le germanium est utilisé pour fabriquer des composants électroniques. On le prépare en faisant agir sur le dioxyde de germanium du dihydrogène. La formule du dioxyde de germanium est GeO_2 .

1/ Écrire l'équation-bilan de la réaction en procédant par analogie avec la réaction du dihydrogène sur l'oxyde de cuivre II.

2/ Quel volume de dihydrogène, mesuré dans les conditions normales de température et de pression, faut-il utiliser pour obtenir 1 kg de germanium? Quelle masse de dioxyde de germanium faut-il traiter?

30.12 Combustion du carbone à volume constant. Dans un récipient indilatable en acier, on enferme 1,2 g de graphite et du dioxygène.

1/ La pression à l'intérieur du récipient est de 4 bars, la température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Sachant que la quantité de dioxygène est exactement celle qui est nécessaire pour transformer tout le graphite en dioxyde de carbone, calculer le volume du récipient. Dans ces conditions, le volume molaire est de $6,1 \text{ l}\cdot\text{mol}^{-1}$.

2/ Quelle est la pression régnant dans le récipient à la fin de l'expérience, c'est-à-dire lorsque le récipient ne contient plus de carbone et que la température est revenue à $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

30.13 1/ L'eau oxygénée est une solution de peroxyde d'hydrogène H_2O_2 dans l'eau. Dans certaines conditions, l'eau oxygénée se décompose en eau et dioxygène. Écrire l'équation-bilan de la réaction.

2/ On dit que l'on a une *eau oxygénée* à 10 volumes lorsqu'un litre de solution peut libérer, selon la réaction précédente, 10 l de dioxygène gazeux, ce volume étant mesuré dans les conditions normales de température et de pression. Quelle masse de peroxyde d'hydrogène contient 1 l d'une solution d'eau oxygénée à 10 volumes?

30.14 1/ Les plantes, grâce à la présence de chlorophylle, absorbent l'énergie lumineuse nécessaire pour effectuer la synthèse du glucose $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ à partir de dioxyde de carbone et de vapeur d'eau. Écrire l'équation-bilan de cette réaction.

2/ Chaque année, 70 milliards de tonnes de carbone sont ainsi fixées par les plantes vertes. Quelle masse de dioxyde de carbone est éliminée de l'atmosphère? Quel volume de dioxygène, mesuré dans les conditions normales de température et de pression est libéré par cette réaction?

Le chlorure de sodium

31.1 état naturel

Le chlorure de sodium, le « sel de cuisine », est un des corps les plus répandus. L'eau de mer en contient des quantités variables ($9 \text{ g} \cdot \ell^{-1}$ en mer Baltique, environ $30 \text{ g} \cdot \ell^{-1}$ dans l'océan Atlantique et la mer Méditerranée). On le trouve aussi à l'état solide : c'est le « sel gemme ». En fait ce dernier a lui aussi une origine marine : les dépôts de sel gemme se sont constitués sur l'emplacement d'anciennes mers qui se sont évaporées après avoir été isolées du reste des océans.



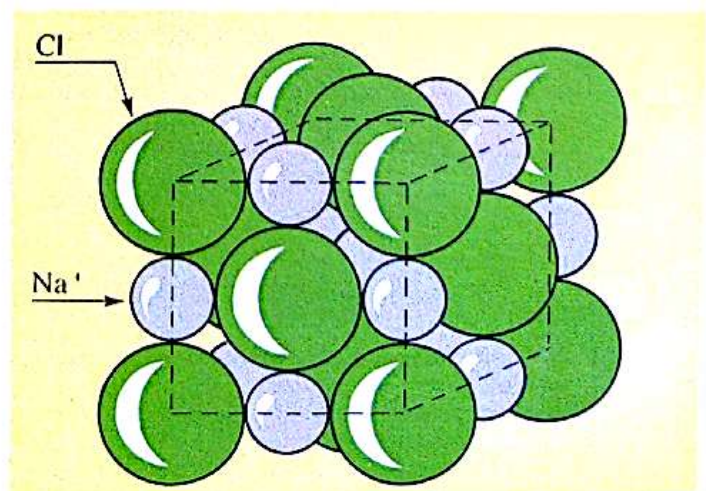
1. A gauche, havage dans une mine de sel gemme. A droite, trémies de chlorure de sodium.

31.2 le cristal de chlorure de sodium

Le chlorure de sodium obtenu par évaporation d'eau salée est formé de petits cubes translucides (*photo 1*) qui s'associent en pyramides creuses, les *trémies*. Étudions l'un de ces petits cubes.

31.2.1 structure

Les procédés modernes d'investigation de la matière montrent que le cristal de chlorure de sodium est constitué par un assemblage régulier d'ions sodium Na^+ et d'ions chlorure Cl^- . La neutralité électrique du cristal est réalisée par l'égalité des nombres d'ions Na^+ et Cl^- . Chaque ion peut être assimilé à une sphère dure de rayon déterminé, appelé *rayon ionique*. Le cristal peut alors être représenté par un empilement compact de grosses sphères, les ions chlorure Cl^- , et de sphères plus petites, les ions sodium Na^+ (*fig. 2*).



2. Structure d'un cristal de chlorure de sodium.

Les ions chlorure et sodium sont régulièrement répartis aux sommets de cubes juxtaposés, de sorte que chaque ion Cl^- est entouré par six cations sodium Na^+ placés aux sommets d'un octaèdre régulier dont l'ion chlorure est le centre; chaque ion sodium Na^+ est également entouré par six anions Cl^- disposés aux sommets d'un octaèdre régulier dont l'ion Na^+ est le centre (fig. 3).

Il est arbitraire d'isoler, au sein du cristal, une paire d'ions Na^+Cl^- : la molécule de chlorure de sodium n'existe pas dans le cristal.

La formule NaCl , attribuée au chlorure de sodium, est celle de son motif élémentaire (cf. paragraphe 27.4) : elle correspond à l'ensemble électriquement neutre formé par le minimum d'ions Na^+ et Cl^- , soit un ion Na^+ pour un ion Cl^- .

Au niveau macroscopique, cette formule représente N_A motifs élémentaires NaCl , c'est-à-dire un ensemble de N_A ions Na^+ et N_A ions Cl^- . La masse molaire, $58,5 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$, correspond à la masse de N_A ions Na^+ ($35,5 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$) et de N_A ions Cl^- ($23,0 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$).

La taille des différents ions (fig. 4) est telle que seuls les ions de charge opposée sont au contact. Les interactions attractives qui résultent de cette disposition confèrent au cristal une grande stabilité.

31.2.2 propriétés physiques

Ces propriétés sont les conséquences de la structure du cristal.

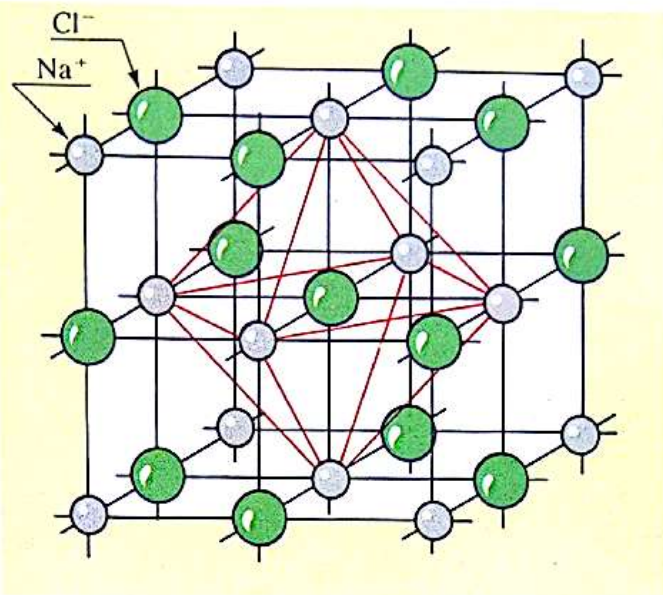
- Le cristal contient des ions, mais ces ions sont obligés de garder une position déterminée : le cristal ne contient donc pas de porteurs de charge mobiles susceptibles d'assurer un courant; le chlorure de sodium solide est un isolant électrique.
- Les interactions attractives entre ions de signe contraire sont très fortes : le cristal est très solide; il faut fournir beaucoup d'énergie pour le disloquer. Le chlorure de sodium est un cristal relativement dur, dont la température de fusion est élevée.

31.3 fusion du chlorure de sodium et son électrolyse

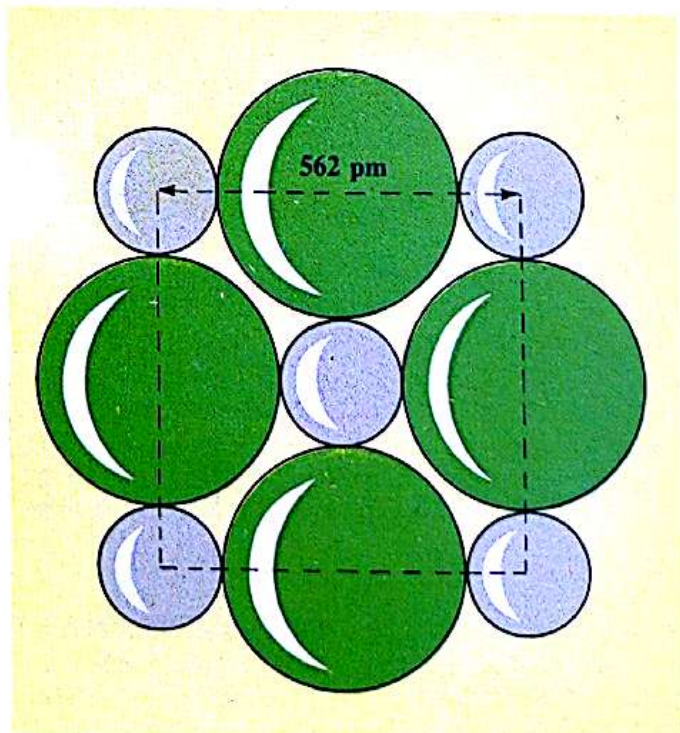
31.3.1 fusion du chlorure de sodium

Le chauffage régulier du chlorure de sodium débarrassé de son eau de cristallisation comporte trois phases :

1. La chaleur fournie sert à élever la température du cristal jusqu'à sa température de fusion ($801 \text{ }^\circ\text{C}$).
2. Dans un deuxième temps, la chaleur fournie provoque la fusion progressive du cristal tandis que la température reste constante pendant toute la durée de cette fusion.
3. Dans un troisième temps, lorsque le dernier cristal a disparu, la chaleur fournie sert à élever la température du liquide obtenu.



3. Maille élémentaire du chlorure de sodium. Chaque ion Cl^- est entouré de six ions Na^+ et chaque ion Na^+ est entouré de six ions Cl^- . Le cristal est constitué par la juxtaposition de telles mailles.



4. Dans le cristal de chlorure de sodium, seuls les ions porteurs de charges opposées sont en contact.

Interprétons ces phénomènes. A l'intérieur du cristal, chaque ion a une position moyenne fixe autour de laquelle il vibre sans cesse. Lorsqu'on fournit de la chaleur au cristal, les vibrations sont de plus en plus importantes : la température du cristal croît. Lorsque la température de fusion est atteinte, les forces d'attraction entre les ions de charge opposée ne sont plus suffisantes pour vaincre l'agitation thermique et ramener les ions à leur position : il apparaît une première goutte de liquide. Si on continue à chauffer, la chaleur que l'on fournit sert à détruire progressivement le cristal, la température restant constante. Après la disparition du dernier grain de solide, la chaleur est à nouveau utilisée pour accroître l'agitation désordonnée des ions, c'est-à-dire pour accroître la température du liquide.

La fusion a fait passer le chlorure de sodium d'un état ordonné, l'état cristallin, à un état désordonné, l'état liquide.

31.3.2 électrolyse du chlorure de sodium fondu

La présence, dans le liquide, d'ions Na^+ et Cl^- libres de se déplacer est confirmée par son caractère conducteur : le chlorure de sodium fondu est un liquide ionique.

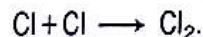
Sous l'action de la tension entre les électrodes, ces ions se mettent en mouvement : les ions chlorure migrent vers l'anode tandis que les ions sodium rejoignent la cathode (fig. 5). Le passage du courant électrique dans le liquide est donc assuré par le déplacement des ions.

Les ions chlorure perdent chacun un électron au contact de l'anode. Après traversée du circuit électrique, ces électrons sont captés sur la cathode par des ions sodium. Le bilan électronique est le suivant :

— à l'anode : $\text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl} + 1e^-$;

— à la cathode : $1e^- + \text{Na}^+ \rightarrow \text{Na}$.

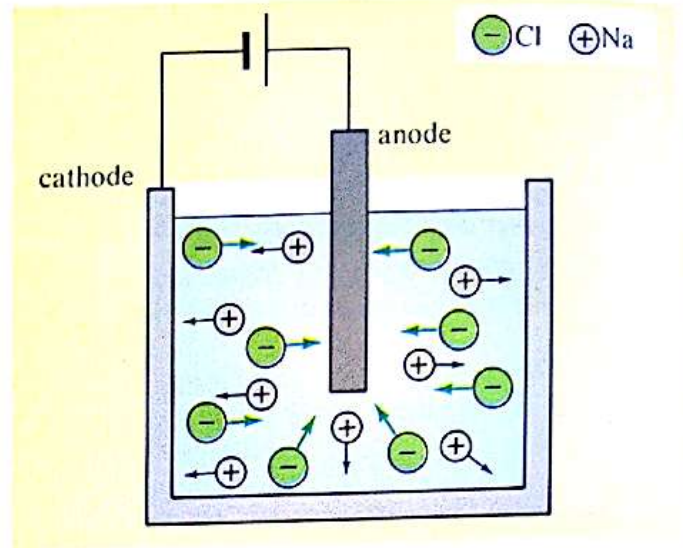
Les atomes de chlore formés se combinent deux à deux pour donner des molécules diatomiques Cl_2 :



Le dichlore Cl_2 est le gaz dont on observe la formation sur l'anode (voir fiche expérimentale 1).

Le liquide est soumis à une électrolyse. Comme son nom l'indique, l'électrolyse consiste en la décomposition, grâce à un générateur électrique, du corps composé NaCl ; on obtient les corps simples correspondants : le métal sodium et le dichlore Cl_2 . C'est une transformation non spontanée qui cesse dès que l'on met le générateur hors circuit. Le rôle du générateur est de fournir l'énergie nécessaire pour arracher les électrons aux anions et les faire circuler jusqu'à la cathode, où les cations sont forcés de les capter.

La neutralisation électrique d'une mole d'ions sodium à la cathode nécessite l'apport d'une mole d'électrons ; de même, lorsqu'une mole d'ions chlorure se décharge à l'anode, cette mole cède à l'électrode une mole d'électrons. Il y a, à chaque instant, autant d'électrons captés par l'anode que d'électrons cédés par la cathode.



5. Mouvement des ions dans le creuset au cours de l'électrolyse du chlorure de sodium fondu.

Remarque : L'électrolyse du chlorure de sodium fondu, réalisée en évitant le contact du sodium obtenu à la cathode avec le dioxygène de l'air, permet la préparation du métal sodium. Le sodium liquide est actuellement utilisé comme fluide caloporteur dans certaines centrales nucléaires.

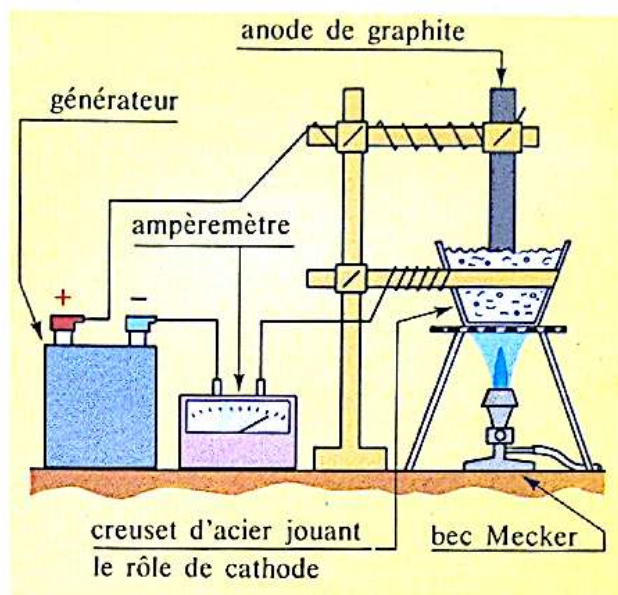
Fiche expérimentale 1

fusion et électrolyse du chlorure de sodium fondu

Dans un creuset métallique, plaçons du chlorure de sodium (sel de cuisine) et chauffons-le grâce à un bec Mecker. Le bec Mecker est un bec de gaz permettant un chauffage plus puissant que le bec Bunsen utilisé habituellement. Au début de l'expérience, nous entendons un crépitement et observons la projection de petits cristaux de sel hors du creuset.

Le sel marin est obtenu par évaporation de l'eau de mer. Au cours de leur formation, les cristaux « emprisonnent » un certain nombre de molécules d'eau. Le chauffage provoque la vaporisation de cette eau et la vapeur d'eau formée exerce une pression suffisante pour faire éclater les cristaux de sel. Ce phénomène est à l'origine du crépitement et des projections observés au début de l'expérience.

Ce crépitement cesse bientôt. Prolongeons le chauffage jusqu'à ce que le creuset soit rouge sombre : les cristaux se sont transformés en un liquide transparent. Plongeons alors dans le creuset une électrode de graphite que nous relierons à la borne positive d'un générateur de courant continu. L'autre borne de ce générateur est reliée, à travers un ampèremètre et un interrupteur, au creuset métallique (fig. 6). Un voltmètre permet de plus de mesurer la tension entre l'électrode de graphite et le creuset. Fermons l'interrupteur. Lorsque la tension est de quelques volts, l'intensité du courant qui traverse le circuit peut atteindre 1 à 2 ampères. Le passage du courant provoque l'apparition, autour de l'anode, de bulles de gaz. Ce gaz formé à l'anode est le *dichlore*.



6. Montage pour réaliser l'électrolyse du chlorure de sodium fondu.

Près de la paroi du creuset métallique (qui sert de cathode), nous remarquons de petites flammes jaunes très intenses. Ces flammes sont dues à la présence du métal *sodium* qui, à cette température, est un liquide moins dense que le chlorure de sodium liquide. Il surnage ainsi au voisinage de la cathode et brûle dans l'air en émettant une lumière jaune très caractéristique. Ces phénomènes cessent dès que l'on ouvre l'interrupteur.

Application 1 :

Le surrégénérateur Super Phénix utilise comme fluide caloporteur 1200 t de sodium liquide. Pour préparer cette quantité de sodium, on effectue l'électrolyse du chlorure de sodium fondu. Quelle est la charge q nécessaire? Quelle est la quantité de dichlore obtenue? Pendant combien de temps l'opération doit-elle se poursuivre si on utilise un courant d'intensité constante et égale à 25 kA?

La masse molaire atomique, M , du sodium est $23,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$. Une masse de sodium m représente une quantité de moles n telle que $n = m/M$, soit ici :

$$n = \frac{1200 \cdot 10^6}{23,0} \approx 52,2 \cdot 10^6 \text{ mol} = 52,2 \text{ Mmol.}$$

Le bilan de l'électrolyse montre que chaque fois qu'une mole de dichlore se forme à l'anode, il apparaît à la cathode deux moles de sodium.

La quantité de dichlore formé est donc $n/2$, soit 26,1 Mmol de molécules de dichlore.

Pour transformer une mole d'ions Na^+ en une mole de métal sodium, une mole d'électrons est nécessaire, ce qui correspond, en valeur absolue, à la charge appelée un *faraday* \mathcal{F} . La charge q , nécessaire pour fabriquer 1200 t de sodium, est :

$$\begin{aligned} q &= n \cdot \mathcal{F} = n \cdot N_A \cdot e \\ &= \frac{1200 \cdot 10^6}{23,0} \times 6,022 \cdot 10^{23} \times 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \\ &\approx 5 \cdot 10^{12} \text{ C.} \end{aligned}$$

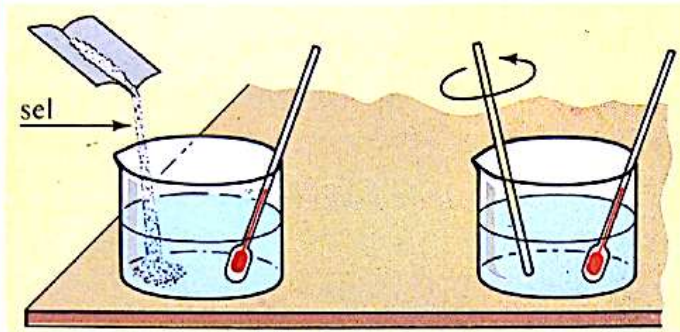
La durée Δt de l'électrolyse est :

$$\Delta t = \frac{q}{I} \approx 201 \cdot 10^6 \text{ s, soit plus de six ans.}$$

L'opération a vraisemblablement été conduite dans plusieurs électrolyseurs montés en série!

31.4 dissolution du chlorure de sodium dans l'eau

Le chlorure de sodium se dissout facilement dans l'eau (fig. 7); cette dissolution ne provoque aucune variation de température de l'eau : la dissolution du chlorure de sodium dans l'eau est athermique.



7. La dissolution du chlorure de sodium est athermique.

Observons ce qui se passe au fur et à mesure que l'on ajoute du sel dans un volume fixé d'eau :

- la dissolution a lieu de plus en plus lentement bien que l'on agite constamment la solution;
- il existe une limite à la dissolution : au-delà d'une certaine quantité, le sel que l'on ajoute ne se dissout plus et forme un dépôt au fond du bécher. On dit alors que la solution est saturée en chlorure de sodium.

La quantité de chlorure de sodium que contient 1 l de solution saturée est appelée solubilité du chlorure de sodium et s'exprime en $\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ ou en $\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$. Ainsi, à la température ordinaire, la solubilité du chlorure de sodium dans l'eau est voisine de $6,15 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$, soit $360 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$.

La température de l'eau a un double effet sur la dissolution du chlorure de sodium :

- la dissolution est d'autant plus rapide que la température est élevée;
- la solubilité du chlorure de sodium augmente légèrement avec la température : elle passe de $360 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ à la température ordinaire à $390 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ à $100 \text{ }^\circ\text{C}$, température d'ébullition de l'eau.

31.5 la solution aqueuse de chlorure de sodium

31.5.1 caractère conducteur

L'expérience d'électrolyse présentée sur la fiche expérimentale 2 démontre que la solution aqueuse de chlorure de sodium conduit le courant électrique; cette solution contient ainsi des ions sodium Na^+ et chlorure Cl^- dispersés parmi les molécules d'eau et pouvant se déplacer au milieu d'elles.

Le nombre d'ions Na^+ dissous est exactement le même que celui des ions Cl^- dissous, de sorte que la solution reste électriquement neutre.

Application 2 :

On introduit 280 g de chlorure de sodium dans un bécher contenant de l'eau. On agite pour favoriser la dissolution et on ajuste le volume à 750 cm^3 . Reste-t-il du sel solide au fond du bécher? Si oui quelle est la masse de sel non dissous? On porte l'eau à une température voisine de $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Le sel est-il entièrement dissous?

A la température ordinaire, 1000 cm^3 d'eau salée peuvent contenir au plus 360 g de chlorure de sodium; 750 cm^3 d'eau salée peuvent donc contenir au plus

$$360 \times \frac{750}{1000} = 270 \text{ g de chlorure de sodium.}$$

Le bécher contient donc une solution saturée de chlorure de sodium et un dépôt solide de 10 g de chlorure de sodium.

A $100 \text{ }^\circ\text{C}$, la solubilité du chlorure de sodium est de $390 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$; 750 cm^3 peuvent donc contenir

$$390 \times \frac{750}{1000} = 292,5 \text{ g de chlorure de sodium.}$$

Le sel est donc entièrement dissous quand la température de la solution atteint $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

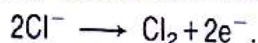


8. Électrolyse industrielle du chlorure de sodium.

31.5.2 électrolyse

Lorsque le courant électrique traverse la solution, des réactions électrochimiques se déroulent aux électrodes.

• A l'anode, les ions chlorure Cl^- sont dépouillés de leur électron excédentaire; les atomes de chlore ainsi formés se regroupent pour donner des molécules de dichlore. Le bilan de ces transformations est :



Le dichlore formé est mis en évidence par ses propriétés décolorantes.

• A la cathode, les réactions sont plus surprenantes. Lorsqu'on impose une tension entre les deux électrodes, les ions sodium Na^+ migrent vers la cathode, mais arrivés là, ils refusent d'accepter les électrons, et ce sont les molécules d'eau qui sont forcées de capter ces derniers selon :



La formation des ions OH^- est signalée par la coloration rouge que prend la phénolphtaléine.

Le bilan de l'électrolyse est donc l'obtention de deux dégagements gazeux, l'un de dichlore, l'autre de dihydrogène, et le remplacement progressif des ions chlorure Cl^- par des ions hydroxyde OH^- . La quantité d'ions sodium que contient la solution n'est pas modifiée. Au cours de l'électrolyse, la solution de chlorure de sodium se transforme petit à petit en solution de soude tandis que se dégagent le dichlore et le dihydrogène. Cette transformation, comme toutes les électrolyses, est une réaction impossible en l'absence de générateur électrique.

Remarque : L'électrolyse des solutions aqueuses de chlorure de sodium est réalisée à l'échelle industrielle (photo 8) pour préparer le dichlore et la soude.

Fiche expérimentale 2

électrolyse d'une solution de chlorure de sodium

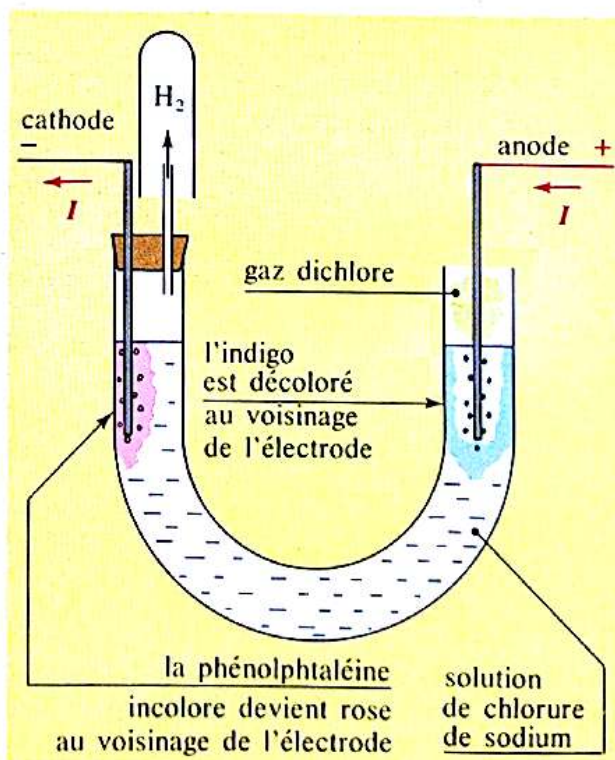
Dans un tube en U, versons une solution aqueuse de chlorure de sodium et introduisons deux électrodes de graphite reliées à un générateur électrique. Dans le compartiment anodique, ajoutons un peu d'*indigo* (c'est un colorant bleu); dans l'autre compartiment, ajoutons quelques gouttes d'une solution incolore de *phénolphtaléine*.

Fermons le circuit électrique; dès que le courant traverse le circuit, des bulles de gaz apparaissent sur les deux électrodes. La phénolphtaléine contenue dans le compartiment cathodique vire au rose puis au rouge tandis qu'au voisinage de l'anode, la teinte bleue de l'indigo s'éclaircit puis disparaît (fig. 9).

Le gaz qui se dégage à l'anode est du dichlore, reconnaissable à son odeur et à ses propriétés décolorantes.

La coloration rose prise par la solution du compartiment cathodique signale l'apparition dans la solution d'ions hydroxyde OH^- .

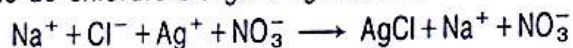
Recueillons dans un tube à essai le gaz, incolore et inodore, qui se dégage sur la cathode. Présentons l'orifice du tube à la flamme d'un bec Bunsen : le gaz brûle avec une petite détonation, caractéristique de la réaction du dihydrogène sur le dioxygène de l'air.



9. Montage pour l'électrolyse de la solution de chlorure de sodium.

31.5.3 réaction avec la solution de nitrate d'argent

Les ions chlorure contenus dans la solution de chlorure de sodium réagissent sur les ions argent contenus dans la solution de nitrate d'argent pour donner un précipité blanc de chlorure d'argent AgCl selon :



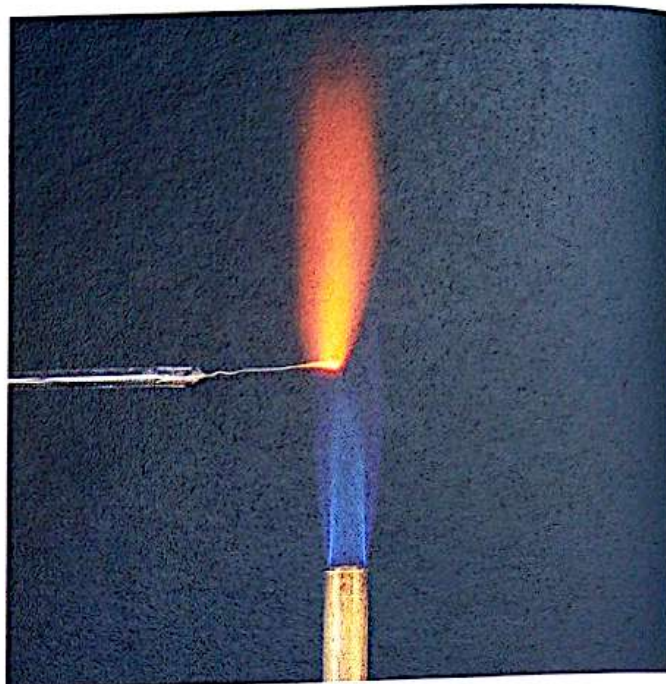
ou encore, en omettant les ions « spectateurs », c'est-à-dire qui ne participent pas à la réaction, Na^+ et NO_3^- :



Ce précipité blanc subit, quand il est abandonné à la lumière vive, une réaction photochimique : il noircit petit à petit. C'est une réaction de même type qui est à la base du procédé de la photographie.

31.5.4 test à la flamme

L'ion sodium Na^+ est très stable en solution aqueuse : il participe rarement à des réactions chimiques. Néanmoins on peut le mettre en évidence grâce à la coloration jaune qu'il donne à la flamme (photo 10) d'un bec Bunsen. Nous avons déjà observé cette coloration jaune de la flamme à la cathode, lors de l'électrolyse du chlorure de sodium fondu.



10. Un fil de platine, soudé sur une tige de verre, a été chauffé jusqu'à ce qu'aucune coloration ne persiste. Une fois trempé dans une solution de chlorure de sodium, on le place au sommet du cône bleu de la flamme du bec Bunsen : la flamme prend une coloration jaune orangé caractéristique de l'élément sodium.

Fiche expérimentale 3

réaction entre les solutions de chlorure de sodium et de nitrate d'argent

• Expérience

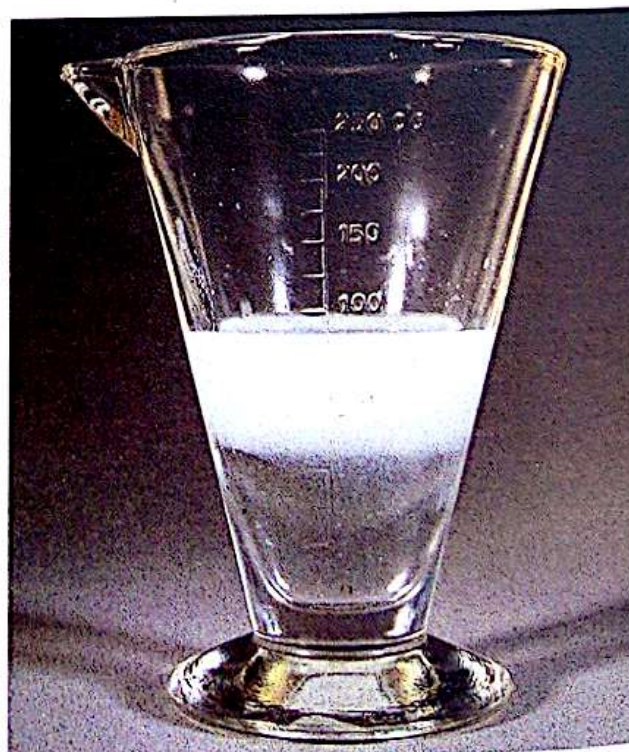
Prenons deux béchers, l'un contenant une solution aqueuse de chlorure de sodium, l'autre une solution de nitrate d'argent. Ces deux solutions sont incolores. La première contient, dispersés au milieu des molécules d'eau, des ions sodium Na^+ et chlorure Cl^- ; la seconde contient des ions argent Ag^+ et nitrate NO_3^- .

Dès que nous mélangeons les deux solutions, un précipité blanc apparaît (photo 11).

Reprenons l'expérience en remplaçant la solution du chlorure de sodium par une solution de chlorure de potassium contenant des ions potassium K^+ et des ions chlorure Cl^- . Le mélange de cette solution et de celle de nitrate d'argent provoque l'apparition du même précipité blanc.

• Interprétation

Les seuls ions communs aux deux expériences sont les ions chlorure Cl^- , argent Ag^+ et nitrate NO_3^- . Le précipité, qui doit être électriquement neutre, ne peut donc provenir que de l'association des ions Ag^+ et Cl^- ; c'est un précipité de chlorure d'argent AgCl .



11. Précipité de chlorure d'argent.

Faire le point

- Qu'appelle-t-on « motif » d'un cristal ionique?
- Quel est l'environnement d'un ion dans le cristal de chlorure de sodium? A quoi est due la stabilité de ce cristal?
- Comparer la conductibilité électrique du chlorure de sodium à l'état solide et à l'état liquide.
- Quelles sont les caractéristiques de l'état solide et de l'état liquide?
- Préciser la nature des porteurs de charge qui assurent le passage du courant dans le circuit d'électrolyse du chlorure de sodium fondu. Indiquer sur un schéma leur sens de déplacement.
- Rappeler la définition du faraday. Quelle est sa valeur en coulombs?
- Qu'est-ce qu'une solution saturée? Définir le terme « solubilité ».
- Comparer les réactions se déroulant aux électrodes lors des électrolyses du chlorure de sodium fondu et en solution aqueuse.
- Écrire le bilan de la réaction du chlorure de sodium avec le nitrate d'argent.
- En quoi consiste le « test à la flamme »?

31.1 On appelle maille de cristal de chlorure de sodium un cube semblable à celui de la figure 3. La longueur de l'arête de la maille est de 562 pm. Quel est le nombre de mailles contenues dans un cube de sel de côté $b = 0,05$ mm?

31.2 Combien trouve-t-on de motifs élémentaires dans la maille du cristal de chlorure de sodium? Pour effectuer le décompte des ions, on remarquera, par exemple, qu'un ion se trouvant à un sommet du cube est partagé entre 8 mailles.

31.3 Quels sont les ions formés à partir du fluor ($Z=9$) et du calcium ($Z=20$)? Quel est le motif élémentaire du fluorure de calcium? Quel est la masse molaire du fluorure de calcium? Combien trouve-t-on de moles d'ions fluorure dans 1,3 mole de motifs élémentaires de fluorure de calcium?

31.4 1/ Rappeler la structure électronique des atomes de brome ($Z=35$) et de potassium ($Z=19$) dans leur état fondamental. Quels sont les ions correspondants? Quel est le motif élémentaire du bromure de potassium?

2/ Un électrolyseur contenant du bromure de potassium fondu est traversé par une quantité d'électricité $q = 0,3$ faraday. Calculer les masses de dibrome et de potassium formés.

Donnée :

$$1 \text{ faraday} = \mathcal{F} = 6,02 \cdot 10^{23} \times 1,60 \cdot 10^{-19} \approx 96\,500 \text{ C.}$$

31.5 1/ Le magnésium a pour numéro atomique $Z=12$. Quelle est sa formule électronique dans l'état fondamental? Dans quelle colonne de la classification périodique se trouve l'élément magnésium? Quel type d'ions donne cet élément?

2/ Dans le cristal d'oxyde de magnésium, les ions oxyde O^{2-} et magnésium Mg^{2+} se disposent selon un assemblage compact, identique à celui du chlorure de sodium. Faire un schéma d'une des faces de la maille élémentaire.

3/ La longueur de l'arête de la maille est de 410 pm. Sachant que le rayon ionique de l'ion oxyde est de 140 pm, calculer le rayon ionique de magnésium.

4/ Comparer les structures électroniques de l'ion magnésium et de l'ion sodium. Le rayon ionique du sodium est de 95 pm. Expliquer l'origine de la différence des rayons ioniques et du magnésium.

31.6 Au cours d'une expérience d'électrolyse du chlorure de sodium fondu, on recueille à l'anode 560 cm^3 de dichlore gazeux (volume mesuré dans les conditions normales de température et de pression).

1/ Calculer la masse de sodium obtenue à la cathode, l'électrolyse étant effectuée à l'abri de l'air.

2/ Quelle masse de chlorure de sodium a-t-on électrolysée?

31.7 L'eau de mer est amenée dans des bassins de 5 m sur 10 m et de 20 cm de profondeur.

1/ Quelle masse de sel peut-on recueillir dans un bassin au bord de la mer Méditerranée?

2/ L'eau de mer s'évapore petit à petit. Quelle est la hauteur d'eau dans un bassin lorsque le chlorure de sodium commence à précipiter?

3/ Vaut-il mieux utiliser deux bassins de 20 cm de profondeur ou un seul de 40 cm de profondeur?

Données : les valeurs nécessaires sont à rechercher dans le texte du Chapitre 31.

31.8 On réalise une expérience d'électrolyse du chlorure de sodium en solution aqueuse. Le dichlore qui se dégage à l'anode est recueilli dans une éprouvette graduée renversée sur une cuve d'eau salée (le dichlore est très peu soluble dans l'eau salée). le volume de dichlore recueilli est de 200 cm^3 ; quelle est la masse de chlorure de sodium électrolysé? (Dans les conditions de l'expérience, 1 atm et 20°C , le volume molaire sera pris égal à $24 \text{ l} \cdot \text{mol}^{-1}$.)

31.9 1/ 10 l d'eau peuvent dissoudre au maximum $18,8 \text{ mg}$ de chlorure d'argent. Calculer sa solubilité en $\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$.

2/ On mélange 50 cm^3 d'une solution de chlorure de sodium à $1 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$ et 50 cm^3 d'une solution de nitrate d'argent à $1 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$. Que se passe-t-il? Quel est le pourcentage d'ions chlorure qui restent en solution?

Les solutions aqueuses ioniques

32.1 les solutions : concentrations des constituants

L'étude faite au chapitre précédent nous a montré que le chlorure de sodium est soluble dans l'eau. On obtient ainsi une solution aqueuse de chlorure de sodium. L'eau est le solvant et le chlorure de sodium dissous le soluté. L'eau d'une part, le chlorure de sodium d'autre part sont des corps purs. La solution obtenue est un mélange de deux corps purs. D'une façon générale, un mélange est caractérisé par le fait qu'on peut faire varier les proportions des corps purs qui le constituent.

Nous avons vu également que l'électrolyse de la solution aqueuse le chlorure de sodium s'interprétait par la présence dans la solution d'ions Na^+ et Cl^- responsables du transport du courant, dans le liquide. Une telle solution est dite ionique.

Pour caractériser la composition d'une solution, on définit les concentrations molaires des différentes espèces présentes, c'est-à-dire les nombres de moles par unité de volume de solution de ces différentes espèces. Pour l'espèce A, la concentration molaire sera notée C_A ou $[A]$. On l'exprime en général en $\text{mol} \cdot \ell^{-1}$.

Ainsi une solution aqueuse de chlorure de sodium de concentration $0,10 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$ est telle que les concentrations molaires en ions Na^+ et Cl^- sont :

$$[\text{Na}^+] = [\text{Cl}^-] = 0,10 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$$

Cela correspond à une concentration massique en chlorure de sodium (dont la masse molaire est $58,5 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$) :

$$0,10 \times 58,5 = 5,85 \text{ g} \cdot \ell^{-1}$$

Les différentes définitions qui précèdent se généralisent à une solution quelconque, ionique ou non. Dans le cas de solutions non ioniques, les espèces A présentes sont des molécules et on définit de la même façon la concentration molaire en molécules A.

Lorsque nous parlerons de « concentration » sans préciser, il s'agira de la concentration molaire.

32.2 dissolution dans l'eau

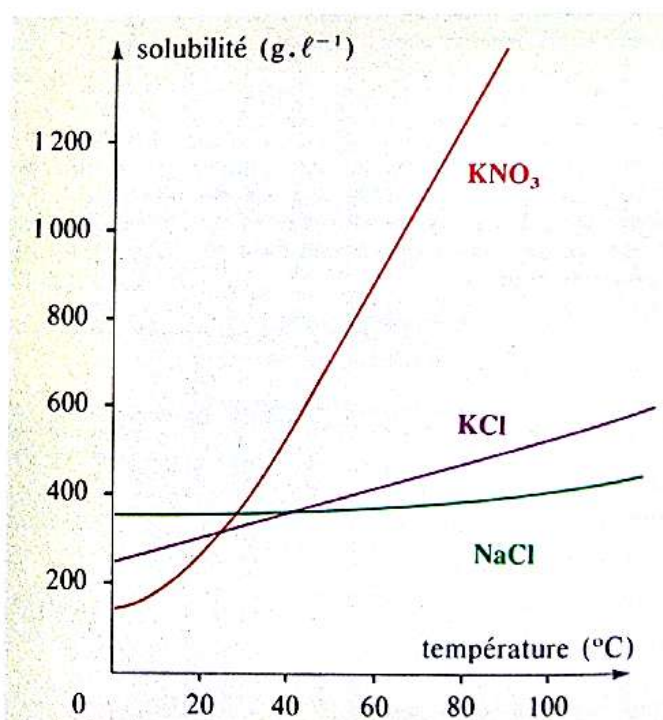
32.2.1 solubilité

L'expérience décrite au chapitre précédent nous a montré que la dissolution dans l'eau du chlorure de sodium a des limites. Ce fait est général : lorsqu'on ajoute des

quantités croissantes de soluté dans une quantité donnée d'eau, il arrive un moment où le soluté cesse de se dissoudre : la solution est alors saturée en soluté. Par définition, la concentration du soluté dans la solution saturée est sa solubilité.

La solubilité d'un soluté dans l'eau dépend bien sûr de sa nature, mais aussi de la température (fig. 1).

Certains corps sont si peu solubles qu'on les qualifie couramment d'« insolubles ». D'autres au contraire ont une solubilité si grande que l'on dit qu'ils sont « solubles » ; il ne faut pas oublier cependant qu'il existe toujours une limite.



1. Solubilité de quelques électrolytes en fonction de la température.

Dans ce qui suit, nous étudierons des substances dont la solubilité dans l'eau est assez forte, de manière à ne pas être gênés par la limite de solubilité.

32.2.2 effet thermique de la dissolution

Les expériences décrites sur la fiche expérimentale 1 montrent que, selon la nature des solutés, la dissolution dans l'eau s'accompagne d'une augmentation ou d'une diminution de la température de la solution obtenue. Dans tous les cas, ces variations de température de la solution sont à relier à l'effet thermique de la dissolution.

En effet, le verre est mauvais conducteur de la chaleur et, comme la dissolution est assez rapide, les échanges thermiques entre la solution et l'extérieur n'ont pas le temps de se faire. Donc :

- Si la dissolution est *exothermique*, c'est-à-dire libère de la chaleur, celle-ci est captée par la solution. L'agitation des molécules d'eau et de soluté augmente : la température de la solution s'élève.
- Si la dissolution est *athermique*, c'est-à-dire se fait sans échange de chaleur, la température de la solution ne varie pas.

- Si la dissolution est *endothermique*, c'est-à-dire absorbe de la chaleur, celle-ci est prélevée sur la solution en réduisant l'agitation des molécules d'eau et de soluté : la température de la solution décroît.

Remarque : Les solutés dont la dissolution est endothermique ont une solubilité qui croît avec la température. Ceux dont la dissolution est exothermique ont une solubilité qui décroît avec la température.

Fiche expérimentale 1

effets thermiques accompagnant la dissolution

Préparons six béchers contenant chacun 50 cm³ d'eau distillée dont nous mesurons la température grâce à un thermomètre à mercure : 21 °C. Dans ces béchers, nous allons dissoudre divers corps purs et suivre l'évolution de la température de la

solution au cours de l'expérience. Pour effectuer une comparaison significative entre les résultats de ces six expériences, il faut que la quantité de matière dissoute dans chaque bécher soit la même, 0,05 mol par exemple.

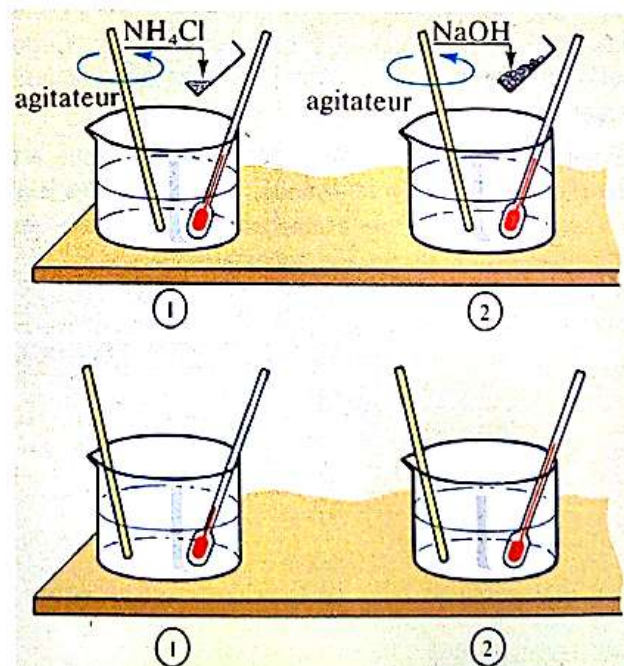
corps dissous	hydroxyde de sodium NaOH	chlorure d'ammonium NH ₄ Cl	saccharose C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	chlorure de sodium NaCl	acide sulfurique H ₂ SO ₄
<i>M</i> (g . mol ⁻¹) masse molaire	40,0	53,5	342	58,5	98,1
<i>m</i> (g) masse de 0,05 mol	2,00	2,67	17,1	2,92	4,90

Les quatre premiers corps sont des solides blancs cristallisés (attention à ne pas toucher avec les doigts les cristaux d'hydroxyde de sodium qui est caustique). Les 0,05 mol sont déterminés par pesée.

L'acide sulfurique est un liquide huileux, très corrosif. Nous ne procéderons donc pas à une pesée. Le flacon qui le contient porte une étiquette indiquant sa densité par rapport à l'eau : 1,83. Sa masse volumique est donc $\rho = 183 \text{ g.cm}^{-3}$. Le volume *V* correspondant à une masse *m* est : $V = m/\rho$. Pour 4,9 g, le volume à mesurer dans une éprouvette graduée est de 2,7 cm³.

Rassemblons dans un tableau les résultats de ces expériences :

corps dissous	NaOH	NH ₄ Cl	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	NaCl	H ₂ SO ₄
variation de température	+8 °C	-2,5 °C	0 °C	0 °C	+18 °C



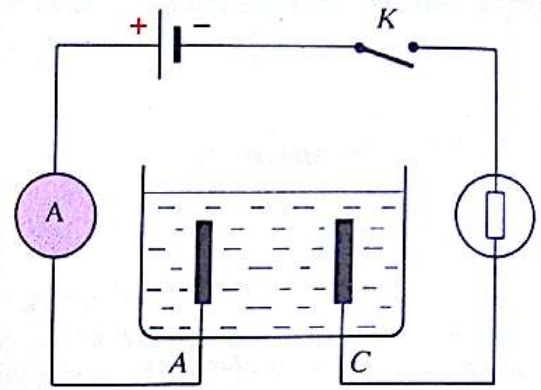
2. Effets thermiques de la dissolution de certains électrolytes.

32.2.3 propriétés conductrices des solutions obtenues

Le montage de la figure 3 permet de vérifier si les différentes solutions sont conductrices de l'électricité. Seule la solution de sucre ne conduit pas le courant. Les autres correspondent à ce que nous avons appelé *solutions d'électrolyte*, ou *solutions ioniques*.

En effet nous savons qu'en solution aqueuse, les électrons ne peuvent pas exister à l'état libre : le courant électrique est assuré par la migration d'ions. Toutes les solutions conductrices contiennent donc des ions, que le soluté soit un corps ionique comme le chlorure d'ammonium NH_4^+ , Cl^- ou un corps moléculaire comme l'acide sulfurique H_2SO_4 .

A l'inverse, une solution de sucre n'est pas ionique. Le soluté reste sous forme moléculaire, c'est-à-dire de particules électriquement neutres, les molécules de sucre. Les molécules, non chargées, sont incapables d'assurer un courant électrique. La solution de sucre est dite *solution moléculaire*.



3. Montage permettant de vérifier la conductibilité d'une solution.

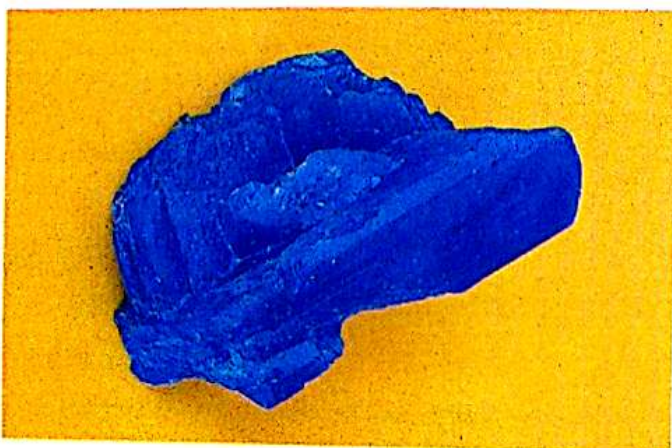
32.3 hydratation des ions

32.3.1 expérience avec le sulfate de cuivre II

Toutes les solutions aqueuses contenant l'ion cuivre II présentent une couleur bleue; c'est donc le cas pour la solution de sulfate de cuivre II : SO_4^{2-} et Cu^{2+} .

A l'état solide, le sulfate de cuivre existe sous forme de beaux cristaux bleus correspondant à la composition $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$: ce sont des cristaux de sulfate de cuivre hydraté. Un chauffage énergique transforme ces cristaux en une poudre grisâtre, du sulfate de cuivre anhydre CuSO_4 . Il suffit d'ajouter quelques gouttes d'eau sur cette poudre pour voir réapparaître la couleur bleue. Cette recoloration s'accompagne d'un important dégagement de chaleur.

Ces expériences nous montrent que la couleur bleue est caractéristique de l'ion cuivre II hydraté. L'hydratation des ions cuivre II est un phénomène exothermique tandis que leur déshydratation est un phénomène endothermique.



4. Cristal de sulfate de cuivre II hydraté.

Application :

Les solubilités dans l'eau du nitrate d'argent et du nitrate de potassium à 20 °C sont respectivement de $1,3 \cdot 10^{-5} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$ et de $2,96 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$. Comparer les volumes minimaux correspondant à la dissolution de 1 g de chacun de ces corps.

Les formules du nitrate d'argent et du nitrate de potassium sont respectivement AgNO_3 et KNO_3 . Leurs masses molaires sont donc de $169,8 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ et de $101,1 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Les solubilités exprimées en $\text{g} \cdot \ell^{-1}$ sont respectivement $2,2 \cdot 10^{-3} \text{ g} \cdot \ell^{-1}$ et $299,2 \text{ g} \cdot \ell^{-1}$.

Les volumes minimaux correspondant à la dissolution de 1 g de chacun des deux corps sont donc respectivement

$$\frac{1}{2,2 \cdot 10^{-3}} \ell \quad \text{et} \quad \frac{1}{299,2} \ell,$$

soit environ :

450 ℓ pour 1 g de nitrate d'argent;

3,3 cm^3 pour 1 g de nitrate de potassium.

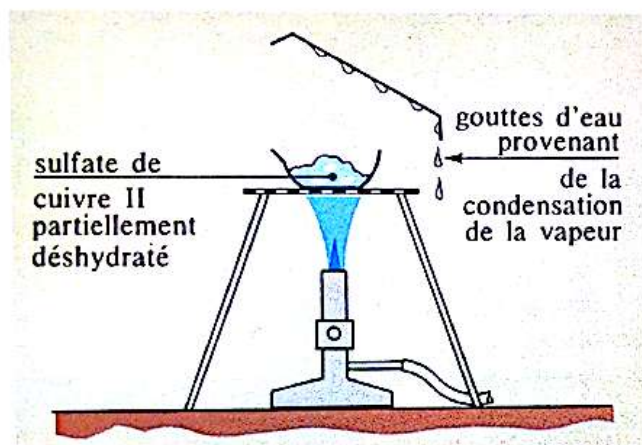
Fiche expérimentale 2

expériences sur le sulfate de cuivre II

1. Préparation du sulfate de cuivre II anhydre

Dans une capsule en pyrex, disposons à peu près 15 g de sulfate de cuivre II hydraté. C'est un solide cristallisé, de couleur bleu. Plaçons la capsule sur une toile d'amiante au-dessus d'un bec Bunsen et chauffons. Nous observons que la coloration bleue des cristaux disparaît tandis que se dégage de la vapeur d'eau que l'on peut condenser sur une paroi froide (fig. 5).

Arrêtons le chauffage lorsque la capsule ne contient plus qu'une poudre grisâtre : du sulfate de cuivre II anhydre CuSO_4 . Laissons-la refroidir à l'abri de l'humidité.



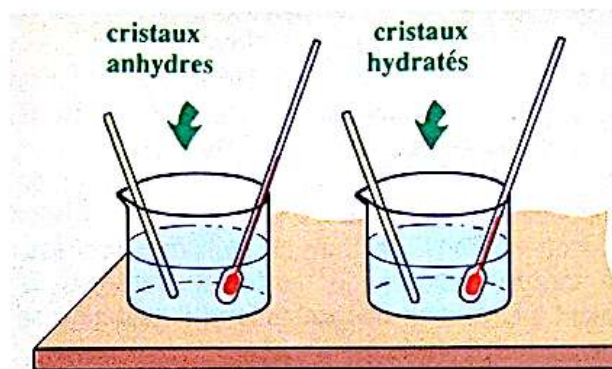
5. Déshydratation du sulfate de cuivre hydraté.

2. Effet thermique de la dissolution

Pesons 0,05 mol de sulfate de cuivre II, anhydre et hydraté : soit environ 8 g de cristaux anhydres et 12,5 g de cristaux bleus.

Dissolvons-les dans 50 cm³ d'eau : la dissolution des cristaux anhydres est rapide; elle s'accompagne de l'apparition de la coloration bleue, caractéristique des ions $\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$, et d'une forte élévation de température (+7 °C).

La dissolution des cristaux bleus est plus lente; la température de la solution ne varie pas. La coloration finale est la même qu'avec les cristaux anhydres.

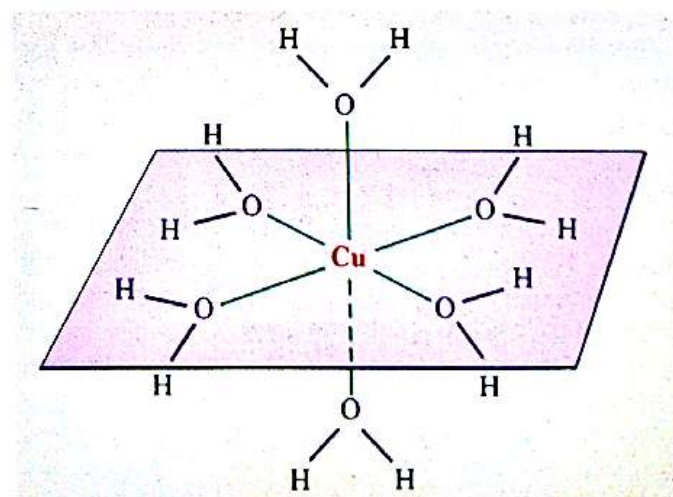


6. Alors que la dissolution du sulfate de cuivre II anhydre est très exothermique, celle du même corps hydraté est pratiquement athermique.

32.3.2 structure du cation cuivre II hydraté

En solution aqueuse, l'ion cuivre II existe sous forme d'un édifice complexe constitué par six molécules d'eau entourant l'ion Cu^{2+} (fig. 7) : cet ion est *hexahydraté*. Les atomes d'oxygène des molécules d'eau constituent les sommets d'un octaèdre dont l'ion Cu^{2+} occupe le centre : cet ion complexe a une structure *octaédrique*.

Remarque : Dans le cristal de sulfate de cuivre hydraté, l'ion Cu^{2+} est entouré par quatre molécules d'eau seulement; une cinquième molécule d'eau est liée aux ions sulfate SO_4^{2-} . Lorsqu'on dissout le sulfate de cuivre hydraté dans l'eau, il se produit une nouvelle hydratation qui fait passer l'entourage de l'ion cuivre II de quatre à six molécules d'eau.



7. Structure du cation $\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$.

32.3.3 généralisation

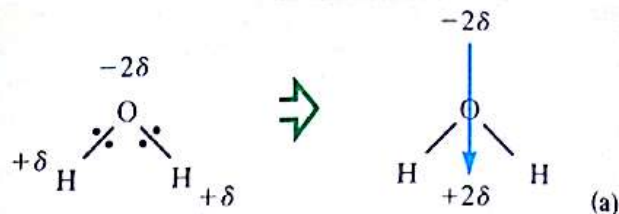
En solution aqueuse, tous les ions sont hydratés, c'est-à-dire liés à des molécules d'eau. Néanmoins, l'état d'hydratation varie avec la nature, la charge et la taille de l'ion considéré.

- Selon le signe de la charge de l'ion, la disposition des molécules d'eau autour de lui est différente (fig. 8).

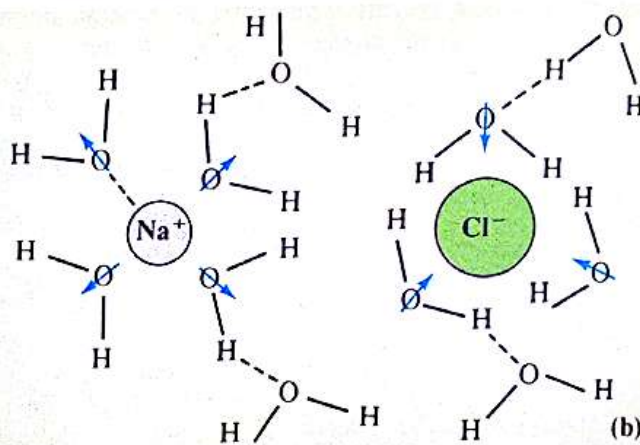
- Les ions petits et fortement chargés tels que les cations aluminium III Al^{3+} , fer II Fe^{2+} , fer III Fe^{3+} , cuivre II Cu^{2+} , etc. interagissent intensément avec les molécules d'eau; les associations qui en résultent possèdent une composition et une structure géométrique bien déterminées : ce sont des ions hexahydratés présentant une structure octaédrique. La plupart absorbent certaines radiations visibles et confèrent ainsi à la solution qui les contient une coloration caractéristique (photo 9).

- Les gros ions peu chargés tels que Na^+ , Cl^- , ... interagissent plus faiblement avec les molécules d'eau : l'ion hydraté correspondant ne possède ni formule définie ni structure particulière.

Quel que soit l'état d'hydratation, l'environnement des ions en solution est très différent de ce qu'il est dans le cristal : dans le cristal, chaque ion est entouré d'un nombre fixé de voisins qui possèdent une charge de signe opposé à la sienne; il est ainsi obligé de garder une position moyenne fixe. Dans la solution au contraire, chaque ion est entouré de molécules d'eau qui le soustraient à l'influence des autres ions; il peut ainsi se mouvoir parmi les molécules d'eau.



8a. La molécule d'eau est un dipôle électrique. L'atome d'oxygène attire plus fortement les électrons que les atomes d'hydrogène. Au point de vue électrique, la molécule est équivalente à 2 charges (-2δ , $+2\delta$) qui constituent un dipôle.



8b. Disposition des molécules d'eau autour des ions.

32.4 interprétation des effets thermiques accompagnant la dissolution

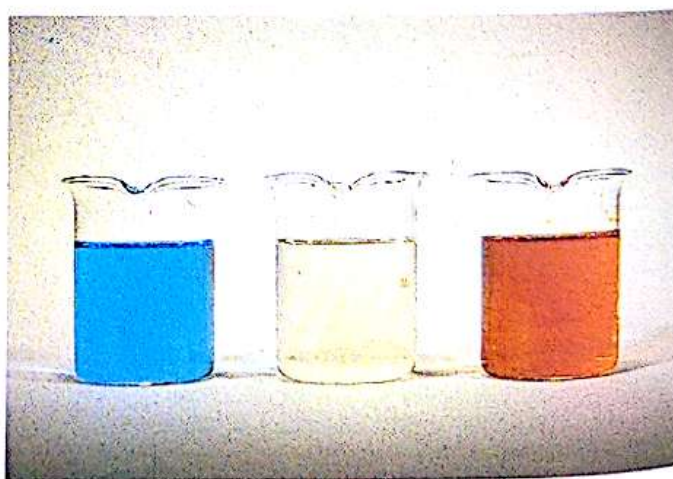
32.4.1 cas des solutions d'électrolyte

Le phénomène de dissolution peut être, fictivement, décomposé en plusieurs étapes :

1. Obtention d'ions indépendants les uns des autres par dislocation du cristal.
2. Dispersion des ions parmi les molécules d'eau.
3. Hydratation des ions.

1^{re} étape : Considérons d'abord le cas des cristaux ioniques comme NaCl , NH_4Cl , ... Ces cristaux sont particulièrement stables comme en témoignent leur dureté et leur point de fusion élevé. Leur dislocation est donc fortement endothermique. Si maintenant l'électrolyte est initialement un corps à structure moléculaire, tel que H_2SO_4 , la première étape est la rupture d'une liaison chimique pour donner naissance à deux ions. Cette rupture nécessite un apport d'énergie : c'est un phénomène endothermique.

formule	couleur	formule	couleur
$[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$	brun-jaune	$[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$	rose
$[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$	vert	$[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$	bleu



9. Cations métalliques en solution aqueuse. De gauche à droite : Cu^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} .

2^e étape : La dispersion des ions formés au milieu des molécules d'eau provoque l'affaiblissement des interactions entre ces molécules. Cette étape est, elle aussi, endothermique.

3^e étape : C'est l'hydratation des ions, c'est-à-dire la formation de liaisons entre les ions et les molécules d'eau. Cette dernière étape est exothermique.

Le bilan énergétique global de la dissolution est la somme des trois bilans partiels. Trois cas sont à envisager :

- La chaleur dégagée au cours de l'hydratation est supérieure à celle absorbée au cours de l'ionisation et de la dispersion, le phénomène global est donc exothermique. La dissolution provoque un échauffement de la solution. Exemple : l'acide sulfurique.
- La chaleur dégagée au cours de l'hydratation est inférieure à celle absorbée au cours des deux autres étapes : le phénomène global est donc endothermique. La dissolution provoque un abaissement de la température de la solution. Exemple : le chlorure d'ammonium.
- Les deux quantités de chaleur sont à peu près égales; l'ensemble est pratiquement athermique et la dissolution se fait sans variation de température. C'est pratiquement le cas du chlorure de sodium.

32.4.2 cas des solutions non ioniques

Nous avons évoqué, à propos de la solution de sucre, les solutions moléculaires. Dans ce cas, comme précédemment, le phénomène de dissolution peut être décomposé en trois étapes :

1. Dislocation du cristal moléculaire.
2. Dispersion des molécules parmi les molécules d'eau.
3. Hydratation des molécules.

Deux différences quantitatives sont à noter :

- les interactions qui assurent la cohésion des cristaux moléculaires ne sont pas aussi intenses que celles qui existent dans les cristaux ioniques. La dislocation d'un cristal moléculaire est donc moins endothermique que celle d'un cristal ionique;
- les interactions entre molécules de soluté et molécules d'eau sont généralement beaucoup moins intenses que celles entre ions et molécules d'eau. L'hydratation des molécules est donc moins exothermique que celle des ions.

Généralement les effets thermiques de la dissolution d'un corps moléculaire sont beaucoup moins importants que ceux d'un corps ionique.

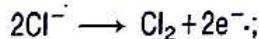
32.5 électrolyse

Dans une solution ionique, les porteurs de charge sont des ions. Dans les électrodes et les fils de connexion du circuit, ce sont des électrons. A la frontière de ces deux zones, c'est-à-dire à la surface des électrodes, ont lieu des phénomènes électrochimiques qui correspondent au changement de nature des porteurs de charge.

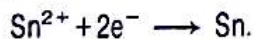
32.5.1 électrolyse du chlorure d'étain II

La solution de chlorure d'étain II contient des ions Cl^- et Sn^{2+} . Lorsque le courant la traverse (fig. 10) :

— des bulles de dichlore apparaissent sur l'anode selon :

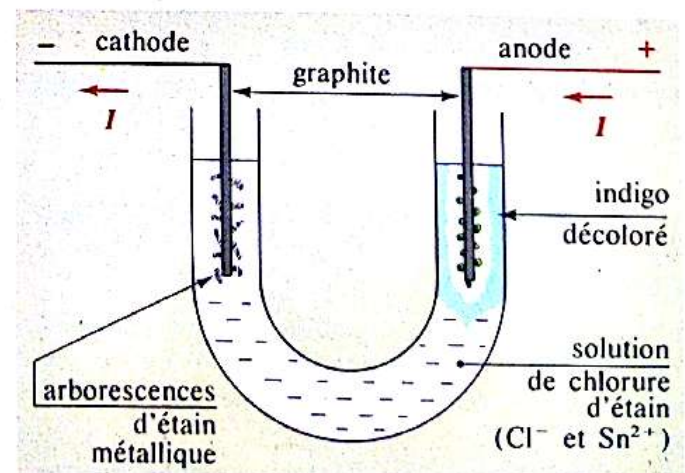


— des arborescences de métal étain se développent sur la cathode selon :



L'énergie nécessaire pour mettre les ions en mouvement, arracher l'électron excédentaire de l'ion chlorure, le faire circuler jusqu'à la cathode puis obliger l'ion étain II à capter deux électrons, est fournie par le générateur électrique.

Chaque fois que deux moles d'ions Cl^- disparaissent de la solution, il disparaît aussi une mole d'ions Sn^{2+} : la neutralité électrique de la solution est donc préservée à chaque instant.

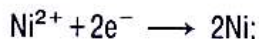


10. Électrolyse de la solution de chlorure d'étain II.

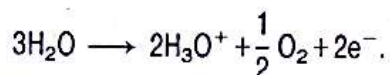
32.5.2 électrolyse du sulfate de nickel

La solution de sulfate de nickel contient des ions Ni^{2+} et SO_4^{2-} . Lorsque le courant la traverse (fig. 11) :

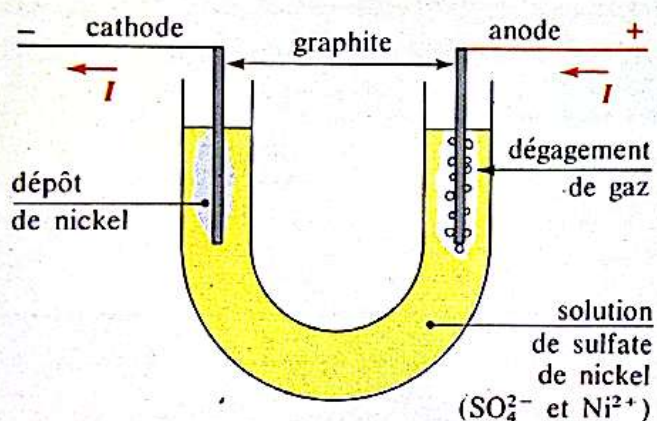
— un dépôt métallique gris brillant de nickel apparaît sur la cathode selon :



— des bulles de gaz se forment sur l'anode. Ce gaz rallume une bûchette présentant un point incandescent; c'est du dioxygène. Cette formation de dioxygène à l'anode est plus surprenante : les ions sulfate SO_4^{2-} migrent vers l'anode, mais arrivés là, ils refusent de se laisser dépouiller de leurs électrons; ce sont les molécules d'eau qui sont contraintes de perdre des électrons selon :



Les molécules d'eau ont réagi de préférence aux ions sulfate SO_4^{2-} très stables.

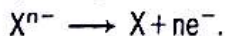


11. Électrolyse d'une solution de sulfate de nickel II.

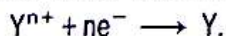
32.5.3 conclusion

Le passage du courant électrique dans une solution d'électrolyte s'accompagne toujours de transformations chimiques s'effectuant sur les électrodes.

L'anode reçoit des électrons qui proviennent des espèces présentes dans le liquide, grâce à une réaction du type :



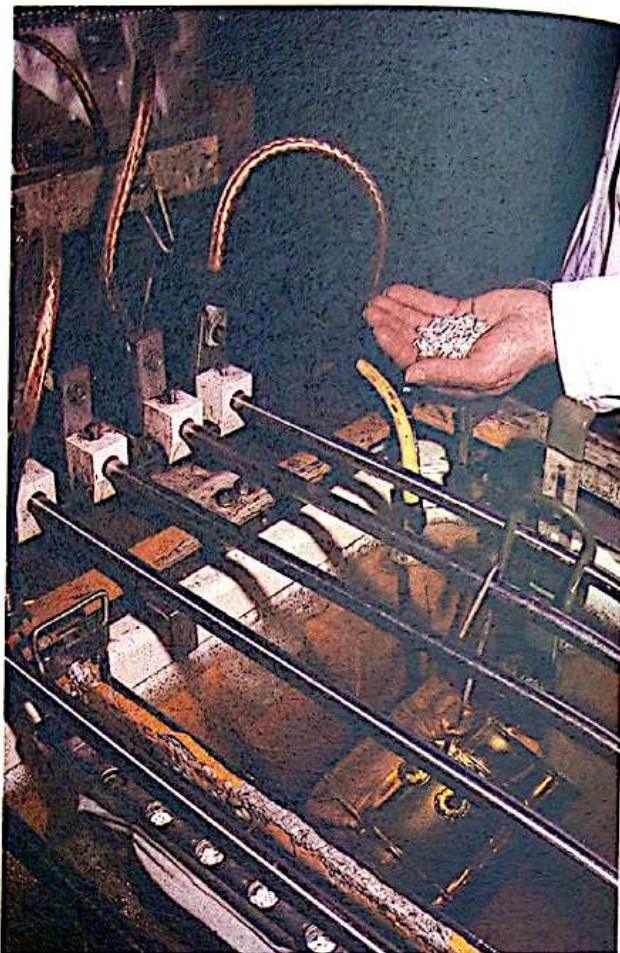
La cathode fournit des électrons aux espèces présentes dans le liquide, grâce à une réaction du type :



Il y a échange d'électrons aux électrodes. L'anode capte autant d'électrons que la cathode en cède pendant un même intervalle de temps.

La transformation chimique globale qui s'effectue quand passe le courant est *endoénergétique* : l'énergie nécessaire à son déroulement est fournie par le générateur électrique.

Certains ions (Na^+ , SO_4^{2-} , ...) sont si stables que les molécules d'eau sont obligées de réagir à leur place.



12. Argenture d'un seau à champagne par électrolyse.

32.6 importance des solutions aqueuses

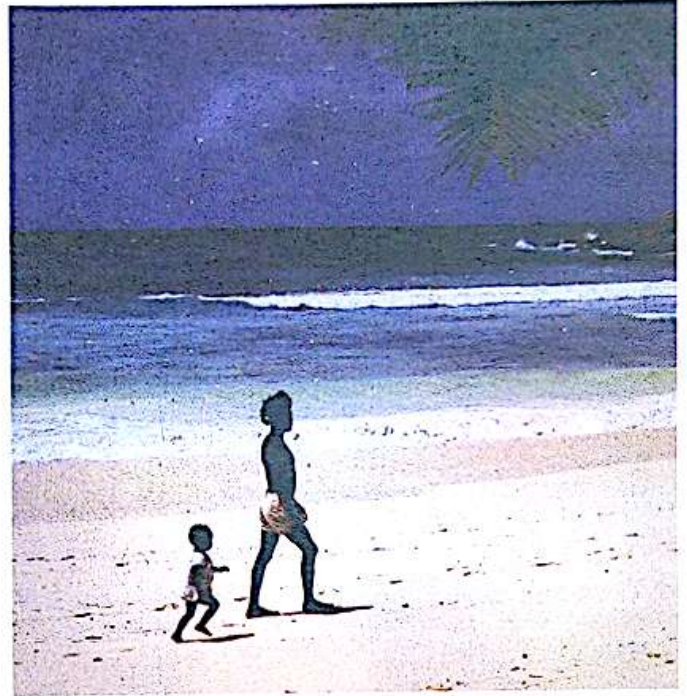
Les solutions aqueuses ont une grande importance.

• Sur le plan biologique, la vie est née en milieu marin il y a des millions d'années et les fluides des organismes vivants actuels ont gardé une étroite parenté avec l'eau de mer (voir tableau ci-après). De nombreux processus (propagation de l'influx nerveux, ...) sont contrôlés par les concentrations des ions contenus dans les cellules.

ions fluides biologiques	ions					
	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
homme	100	3,5	1,7	0,8	71	1,7
grenouille	100	2,4	1,9	1,2	72	0
langouste	100	1,9	2,3	1,0	110	2,2
eau de mer	100	2,2	2,3	12	120	7,2

Compositions relatives (rapportées à 100 ions sodium) de divers fluides biologiques et de l'eau de mer.

• Sur le plan industriel, l'eau est un corps abondant donc bon marché; elle dissout un grand nombre de corps. L'eau est donc le solvant industriel par excellence. L'électrolyse des solutions aqueuses est une méthode très employée: préparation du cuivre, du zinc, du dichlore, ...; purification de métaux; dépôt métallique (chromage, nickelage, argenture, ...).



Faire le point

- Définir les termes : corps pur, corps simple, corps composé.
- Qu'appelle-t-on « concentration molaire » et « concentration massique » d'une solution? Comment passe-t-on de l'une à l'autre?
- Définir la solubilité d'un corps.
- Citer un exemple de soluté dont la dissolution dans l'eau est endothermique? athermique? exothermique?
- Le sulfate de cuivre anhydre est blanc. Abandonné à l'air, il se colore lentement en bleu. Justifier cette observation.
- Quelle est l'orientation des molécules d'eau autour d'un cation? d'un anion?
- Faire un schéma d'un ion hydraté à structure octaédrique.
- Citer les trois étapes du processus de dissolution et préciser leur effet thermique.
- Quelles sont les réactions se déroulant à l'anode et à la cathode lors de l'électrolyse d'une solution de chlorure d'étain II?
- Comparer l'électrolyse des solutions de SnCl_2 et de NaCl .

32.1 On dispose de 0,5 l de solution aqueuse contenant 45 g de chlorure de sodium. Quelle est la concentration molaire de la solution?

32.2 On dispose de 100 cm³ de solution aqueuse contenant 9,9 g de chlorure de cuivre II anhydre. Quelles sont les concentrations en ions cuivre II et en ions chlorure?

32.3 Quelle masse de sulfate de cuivre II faut-il dissoudre dans 500 cm³ d'eau pour obtenir une solution où la concentration en ions cuivre II est de 0,025 mol.l⁻¹?

Données : le solide cristallisé a pour formule $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$.

32.4 750 cm³ de solution aqueuse contiennent 15 g de chlorure de potassium et 35 g de sulfate de potassium.

1/ Quelles sont les formules du chlorure de potassium et du sulfate de potassium?

2/ Quelles sont les concentrations molaires et massiques de cette solution?

3/ En solution aqueuse, le chlorure et le sulfate de potassium sont entièrement dissociés en ions. Quelles sont les concentrations en chacun de ces ions?

32.5 Quelle est la masse de sulfate de fer II ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) dissoute dans 100 cm³ d'une solution contenant 10⁻³ mol.l⁻¹?

32.6 2 l de solution aqueuse contiennent 20 g de chlorure de sodium et 30 g de chlorure de potassium. Calculer les concentrations molaires des différents ions. Vérifier l'électroneutralité de la solution.

32.7 Le « sel de Mohr » est un corps cristallisé possédant la composition molaire suivante : $\text{FeSO}_4 \cdot (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. On dissout 0,784 g de sel de Mohr dans 100 cm³ d'eau. Calculer les concentrations molaires des différents ions de la solution.

32.8 On dispose d'une solution de chlorure d'ammonium contenant 40 g.l⁻¹. On veut préparer 1 l de solution à 0,1 mol.l⁻¹ en chlorure d'ammonium. Comment faut-il opérer?

32.9 Au soleil et un jour de mistral, l'eau d'un bassin s'évapore à compter d'un litre par heure. Le bassin contient initialement de l'eau de mer de concentration massique en chlorure de sodium égale à 30 g.l⁻¹. Comment varie la concentration de la solution en fonction du temps? Quelle sera la concentration au coucher du soleil (8 h d'ensoleillement) d'une solution dont le volume initial est de 24 l?

32.10 L'acide éthanóïque est un liquide moléculaire de formule $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$. Lorsqu'on mélange 300 g d'acide éthanóïque et 500 cm³ d'eau, on obtient 700 cm³ d'une solution homogène. Montrer qu'il y a eu variation de volume lors du mélange. Calculer les concentrations massique et molaire en acide éthanóïque dans la solution obtenue.

Donnée : La masse volumique de l'acide éthanóïque pur est de 1049 kg.m⁻³.

32.11 La solubilité du sulfure de fer est de 1,8.10⁻⁷ mol.l⁻¹. Dans un tube à essai, on introduit 3 g de sulfure de fer et 10 cm³ d'eau. Quelle est la masse de sulfure de fer qui passe en solution?

32.12 200 cm³ d'eau peuvent dissoudre au maximum 1 g de chlorure de plomb II. Quelle est la solubilité du chlorure de plomb II? Quelles sont les concentrations des différents ions dans une solution saturée?

32.13 1/ A 40 °C, un litre de solution contient au maximum 458 g de chlorure d'ammonium. Quelle est la concentration des ions dans la solution saturée?

2/ La dissolution de chlorure d'ammonium est endothermique. Que se passe-t-il si on refroidit la solution saturée de 40 °C à 10 °C?

32.14 La solubilité du carbonate de cuivre II est de 2,2.10⁻⁵ mol.l⁻¹. Quelle masse maximale de carbonate de cuivre II peut dissoudre 1 m³ d'eau?

32.15 Le nitrate de potassium a une solubilité de 160 g.l⁻¹ à 0 °C et de 90 g.l⁻¹ à 50 °C. Quel est l'effet thermique de la dissolution?

32.16 Le carbonate de lithium Li_2CO_3 a une solubilité de 14,3 g.l⁻¹ à 10 °C. On en introduit 5 g dans 200 cm³ d'eau, on agite pour favoriser la dissolution.

1/ Quelles sont les concentrations dans la solution obtenue? Le mélange est-il homogène?

2/ On ajoute 100 cm³ d'eau. Qu'observe-t-on? Calculer les nouvelles concentrations.

3/ On ajoute à nouveau 100 cm^3 d'eau. Quelles sont les concentrations finales?

4/ On chauffe la solution obtenue et l'on voit réapparaître le précipité. Quel est l'effet thermique de la dissolution du carbonate de lithium?

32.17 On réalise l'électrolyse d'une solution aqueuse de chlorure d'étain II entre des électrodes de graphite.

1/ Faire un schéma de l'électrolyseur et indiquer la nature et le sens de déplacement des porteurs de charge dans les différentes parties du circuit.

2/ Écrire le bilan des réactions se déroulant aux électrodes.

3/ On utilise 400 cm^3 d'une solution contenant $0,2 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$ et un courant d'intensité égale à $0,5 \text{ A}$. Au bout de combien de temps la concentration en étain II dans la solution atteint-elle la valeur $0,02 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$?

32.18 On électrolyse une solution aqueuse de chlorure de cuivre II entre des électrodes en charbon. L'intensité du courant électrique est maintenue constante et égale à $1,2 \text{ A}$. La masse de cuivre déposée à la cathode à la fin de l'expérience est de 15 g .

1/ Calculer la masse de dichlore obtenu.

2/ Calculer le volume du dichlore dans les conditions normales de température et de pression.

3/ Calculer la charge ayant traversé le circuit électrique et le temps pendant lequel a duré l'expérience.

32.19 Deux électrolyseurs sont montés en série : le 1^{er} contient une solution de chlorure de cuivre II; le 2^e une solution de chlorure d'étain II. Toutes les électrodes sont en graphite. Sachant qu'au bout de 40 minutes, on a recueilli 2 g de cuivre métallique, quelle est la masse d'étain obtenue?

32.20 1/ On électrolyse, entre électrodes de graphite une solution d'iodure de potassium. Indiquer le sens de déplacement des ions dans la solution.

2/ A l'anode apparaît une coloration brun-jaune due au diiode I_2 . Écrire l'équation de la réaction de formation du diiode.

3/ A la cathode, on observe un dégagement gazeux. Le gaz obtenu, incolore, inodore, est inflammable. Il détone légèrement à l'air. De plus, de la phénolphtaléine devient rouge au voisinage de la cathode. Interpréter ces observations et écrire l'équation de la réaction se déroulant à la cathode.

L'acide chlorhydrique

Notion de pH

33.1 le gaz chlorure d'hydrogène

33.1.1 le chlorure d'hydrogène

Nous avons étudié au chapitre 28 la structure de la molécule de chlorure d'hydrogène HCl : les deux atomes y sont unis par une liaison covalente simple.

Le corps pur chlorure d'hydrogène est constitué de molécules HCl. A la température et sous la pression ordinaires, le chlorure d'hydrogène est un gaz incolore, d'odeur piquante, plus dense que l'air.

33.1.2 solubilité dans l'eau

L'expérience de la fiche expérimentale 1 met en évidence la très grande solubilité du chlorure d'hydrogène dans l'eau.

On a pu mesurer, sous la pression atmosphérique normale, qu'un seul litre d'eau liquide peut dissoudre jusqu'à 525 l de gaz HCl à 0 °C et 445 l à 20 °C! Cette dissolution s'accompagne d'un dégagement de chaleur.

- Le gaz chlorure d'hydrogène est très soluble dans l'eau. Sa dissolution est exothermique.

33.2 la solution aqueuse de chlorure d'hydrogène

33.2.1 électrolyse

La solution de chlorure d'hydrogène pourrait être, a priori, constituée de molécules de chlorure d'hydrogène HCl dispersées parmi les molécules d'eau. Si c'était le cas, cette solution ne serait pas conductrice puisqu'elle ne contiendrait pas d'ions, porteurs de charge...

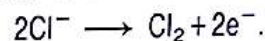
En fait l'électrolyse de cette solution (voir fiche expérimentale 1) montre que :

- La solution de chlorure d'hydrogène est conductrice.
- Le phénomène d'électrolyse s'accompagne :
 - de la formation de dihydrogène H₂ à la cathode,
 - de la formation de dichlore Cl₂ à l'anode.

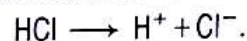
33.2.2 que contient la solution?

Conductrice, la solution contient des ions.

La formation de dichlore Cl₂ à l'anode indique la présence d'ions chlorure Cl⁻. Comme dans l'électrolyse de la solution de chlorure de sodium (Na⁺ et Cl⁻), les ions Cl⁻ qui viennent au contact de l'anode sont contraints de perdre chacun un électron :



D'où proviennent ces ions Cl⁻? Nous admettons que lors de la dissolution, les molécules de chlorure d'hydrogène se dissocient en ions selon :



Il y a rupture de la liaison H—Cl sous l'influence des molécules d'eau. Chaque proton H⁺ libéré est fixé par une molécule d'eau H₂O, et donne un ion hydronium H₃O⁺. Les ions H₃O⁺ et Cl⁻ s'entourent de molécules d'eau et se dispersent. Ils sont alors notés H₃O_{aq}⁺ et Cl_{aq}⁻ («aq» pour aqueux).

- La dissolution du gaz chlorure d'hydrogène dans l'eau est une véritable réaction chimique; les molécules HCl réagissent avec les molécules d'eau H₂O pour donner des ions selon :



Lors de l'électrolyse, au contact de la cathode, les ions hydronium H₃O_{aq}⁺ libèrent des protons H⁺ qui reçoivent alors des électrons pour se transformer en atomes d'hydrogène H. Ces atomes s'associent deux par deux pour donner des molécules de dihydrogène H₂ :



La solution qui contient des ions H₃O_{aq}⁺ et Cl_{aq}⁻ est appelée **solution d'acide chlorhydrique**.

Remarque : Pour simplifier l'écriture, les ions H₃O_{aq}⁺ et Cl_{aq}⁻ seront dans la suite simplement notés H₃O⁺ et Cl⁻.

33.3 propriétés d'une solution d'acide chlorhydrique

La solution d'acide chlorhydrique possède les propriétés des ions Cl⁻ et H₃O⁺ qu'elle contient.

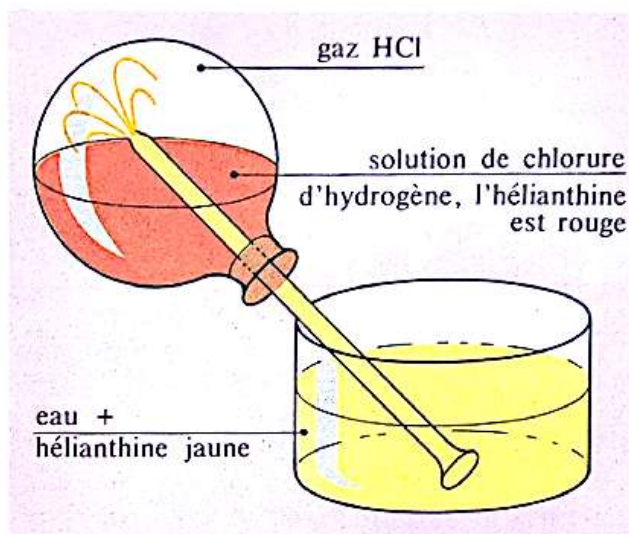
Fiche expérimentale 1

dissolution du gaz HCl

Un flacon bien sec contient du gaz chlorure d'hydrogène (HCl). Le bouchon est traversé par un tube de verre. Le flacon est retourné, l'extrémité du tube de verre plongeant dans de l'eau qui contient quelques gouttes d'hélianthine (couleur jaune). Un peu d'eau monte alors dans le tube.

Tout en bouchant le tube, retournons l'ensemble pour que quelques gouttes d'eau tombent dans le flacon. Replaçons alors le tube dans l'eau : celle-ci est aspirée et jaillit tel un geyser dans le flacon. La solution est alors colorée en rouge par l'hélianthine.

Cette expérience montre la facilité avec laquelle le gaz HCl se dissout dans l'eau. Des molécules du gaz HCl occupant tout le volume du flacon, un grand nombre d'entre elles se précipitent dans le volume réduit des premières gouttes d'eau. Le nombre de molécules de gaz diminuant, la pression dans le flacon diminue et il y a aspiration de l'eau.



Le gaz chlorure d'hydrogène est facilement soluble dans l'eau.

électrolyse d'une solution de chlorure d'hydrogène

La solution de chlorure d'hydrogène obtenue par dissolution de gaz HCl dans l'eau est soumise à l'électrolyse. Les électrodes utilisées sont inattaquables.

Nous observons que :

- La solution conduit bien le courant; la solution contient donc des ions. Il ne s'agit pas d'un mélange de molécules HCl dispersées parmi les molécules H₂O.

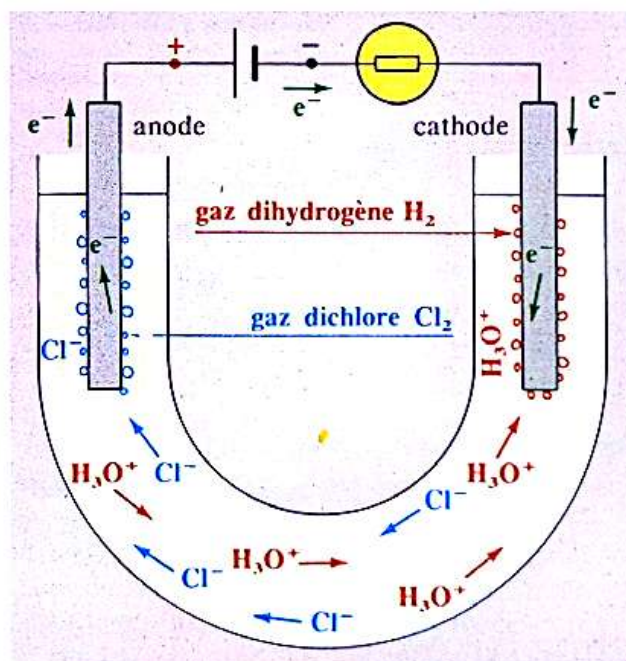
- A l'anode, se forme du dichlore Cl₂; ce gaz est reconnaissable à son odeur (semblable à l'eau de Javel) et au fait qu'il décolore un colorant comme la teinture bleue d'indigo. Nous en déduisons que la solution contient des ions chlorure Cl⁻ qui réagissent au contact de l'anode selon :



- A la cathode, se forme du dihydrogène H₂; ce gaz, incolore, inodore, détone légèrement à la flamme en présence d'air. On pense qu'au contact de l'eau les molécules HCl se brisent selon :



La solution contient des ions H₃O⁺ qui réagissent au contact de la cathode selon :



Une solution de chlorure d'hydrogène subit l'électrolyse avec formation de dihydrogène H₂ à la cathode et de dichlore Cl₂ à l'anode.

33.3.1 propriétés des ions chlorure Cl^-

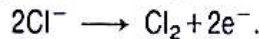
• Lorsqu'on mélange une solution de chlorure d'hydrogène (H_3O^+ et Cl^-) avec une solution de nitrate d'argent (Ag^+ et NO_3^-), on observe un précipité blanc (*photo 1*). Ce précipité blanc est du chlorure d'argent AgCl .

Les ions Ag^+ et Cl^- réagissent donc entre eux, selon :



Dans cette expérience, les ions H_3O^+ et NO_3^- ne réagissent pas. Ils restent « spectateurs », toujours dispersés parmi les molécules d'eau.

• Nous avons vu qu'une électrolyse peut(*) transformer les ions Cl^- en gaz dichlore Cl_2 selon :



Ces deux propriétés sont communes à toutes les solutions qui contiennent des ions chlorure Cl^- : chlorure de sodium (Na^+ et Cl^-), chlorure de calcium (Ca^{2+} et 2Cl^-), etc.



1. Il suffit d'ajouter quelques gouttes d'une solution de nitrate d'argent dans une solution d'acide chlorhydrique pour observer un précipité blanc de chlorure d'argent.

33.3.2 propriétés des ions hydronium H_3O^+

Ce sont les propriétés des ions H_3O^+ qui confèrent à la solution son caractère acide.

Résumons les résultats des expériences décrites dans la fiche expérimentale 2 :

1. Action sur les indicateurs colorés

Certaines substances colorées sont sensibles aux ions H_3O^+ . Elles seront toujours utilisées en très faible quantité (quelques gouttes suffisent pour un tube à essai). Dans l'eau pure ou dans une solution pure de chlorure de sodium, ces substances apparaissent sous une certaine couleur (*fig. 2*) :

- hélianthine : jaune;
- bleu de bromothymol : vert.

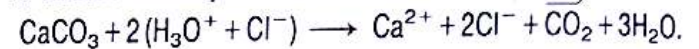
Dans une solution d'acide chlorhydrique, leur couleur est la suivante :

- hélianthine : rouge;
- bleu de bromothymol : jaune.

Nous admettrons que les ions H_3O^+ sont responsables de ce changement de teinte (ou *virage*), la responsabilité des ions Cl^- étant écartée puisque une solution de chlorure de sodium ne provoque pas de virage.

Un autre indicateur, la phénolphaléine, incolore dans l'eau pure, reste incolore dans la solution d'acide chlorhydrique.

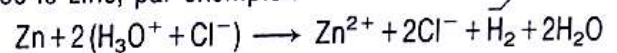
2. Réaction chimique avec le calcaire



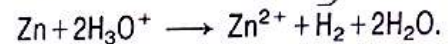
Cette réaction est utilisée pour savoir si une roche contient du calcaire.

3. Réactions chimiques avec certains métaux

Avec le zinc, par exemple :



ou plus simplement, en n'écrivant pas les ions « spectateurs » Cl^- :



Cette réaction est utilisée pour préparer du dihydrogène au laboratoire.

On note que dans cette réaction l'atome de zinc perd deux électrons puisqu'il est transformé en ion Zn^{2+} . Une telle transformation chimique avec *perte d'électrons* est appelée *oxydation* : le zinc a été oxydé en ions Zn^{2+} par les ions H_3O^+ .

Toutes les solutions contenant des ions H_3O^+ en quantité suffisante présentent ces trois propriétés.

	solution acide assez concentrée	eau pure
Hél	rouge	jaune
BB	jaune	vert
PP	incolore	incolore

2. Action des ions hydronium H_3O^+ sur les indicateurs colorés : hélianthine (Hél), bleu de bromothymol (BB) et phénolphaléine (PP).

(*) Selon le pH (voir plus loin), l'eau peut se décomposer préférentiellement à l'anode avec dégagement de dioxygène.

Fiche expérimentale 2

propriétés des ions H_3O^+

• Action sur les indicateurs colorés

Nous disposons, en solution dans des flacons compte-gouttes, de trois réactifs appelés « indicateurs colorés ». Il s'agit de l'hélianthine (Hél), du bleu de bromothymol (BB) et de la phénolphthaléine (PP).

Préparons trois tubes à essais contenant de l'eau pure et trois tubes contenant une solution assez concentrée d'acide chlorhydrique. Ajoutons quelques gouttes d'indicateur dans l'eau puis dans l'acide; chaque indicateur adopte une teinte particulière.

Si l'on ajoute quelques grains de chlorure de sodium dans l'eau pure, les indicateurs ne changent pas de teinte.

Si, maintenant, nous mettons ces indicateurs dans une solution d'acide chlorhydrique très diluée (quelques gouttes de la solution précédente dans beaucoup d'eau), alors l'hélianthine reste jaune, comme dans l'eau pure, tandis que le bleu de bromothymol devient jaune.

Le bleu de bromothymol permet de différencier une solution acide de l'eau pure. L'hélianthine permet de reconnaître une solution acide assez concentrée.

• Action sur certains métaux

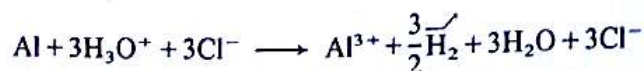
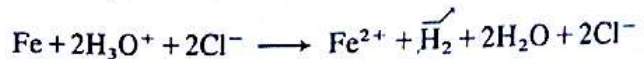
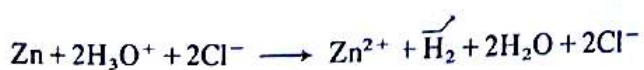
Nous disposons dans des tubes à essai de grenaille de métal zinc (Zn), de limaille de métal fer (Fe) de copeaux de métal cuivre (Cu) et de poudre de métal aluminium (Al).

Ajoutons sur ces métaux une solution assez concentrée d'acide chlorhydrique (H_3O^+ et Cl^-).

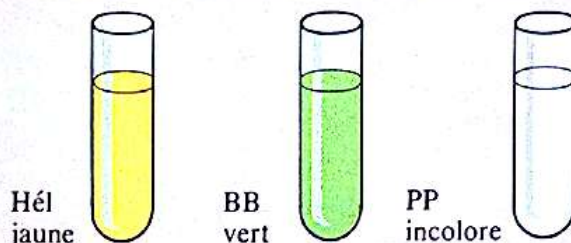
La solution acide attaque les métaux zinc, fer et aluminium avec un dégagement gazeux. Obturons les tubes correspondants avec le doigt pour retenir le gaz, puis présentons leur ouverture à proximité d'une flamme : une légère détonation se produit, qui caractérise le gaz dihydrogène (H_2).

En revanche, la solution d'acide chlorhydrique n'attaque pas le métal cuivre.

Les équations-bilans des réactions observées s'écrivent :



eau pure ou solution de chlorure de sodium

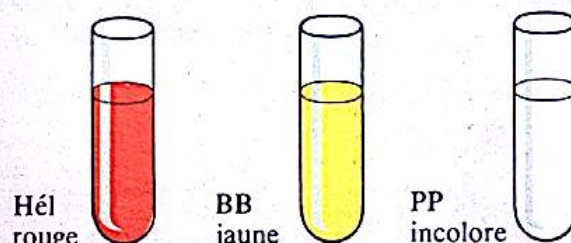


Hél
jaune

BB
vert

PP
incolore

solution d'acide chlorhydrique assez concentrée

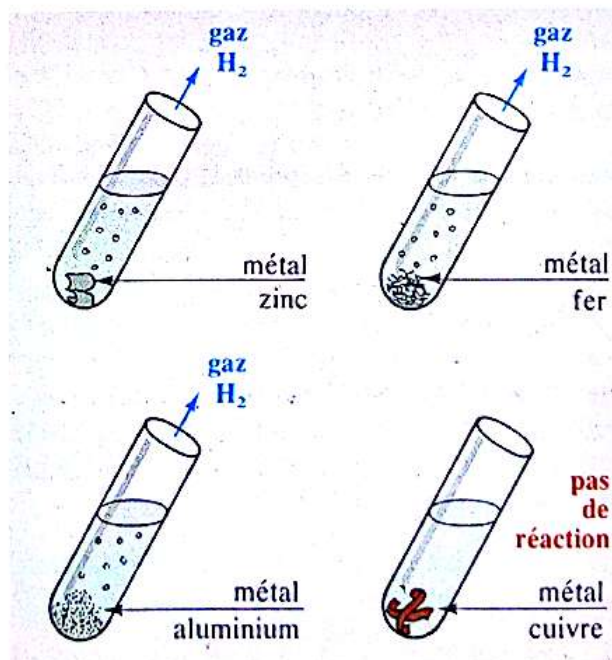


Hél
rouge

BB
jaune

PP
incolore

La phénolphthaléine, elle, est restée incolore.
La phénolphthaléine ne permet aucune distinction entre solutions acides et eau pure.



gaz
 H_2

gaz
 H_2

métal
zinc

métal
fer

gaz
 H_2

pas
de
réaction

métal
aluminium

métal
cuivre

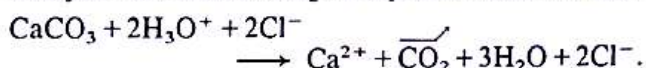
Une solution d'acide chlorhydrique attaque certains métaux avec dégagement de gaz dihydrogène.

Fiche expérimentale 2

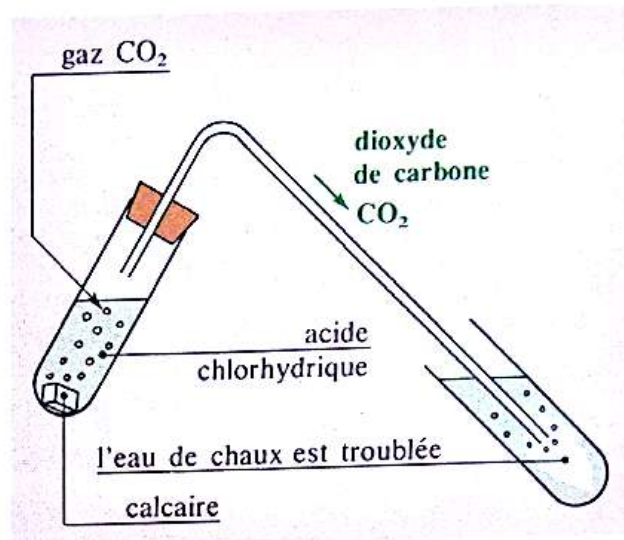
propriétés des ions H_3O^+

• Action sur le calcaire

Certaines roches sont constituées de calcaire, c'est-à-dire de carbonate de calcium $CaCO_3$. Les « craies » de section carrée utilisées pour écrire au tableau sont généralement du calcaire (les autres sont en plâtre ou en sulfate de calcium $CaSO_4$). Sur un morceau de calcaire, versons un peu d'acide chlorhydrique : nous observons une effervescence. Le calcaire est attaqué avec dégagement d'un gaz qui, conduit dans l'eau de chaux, provoque un trouble : c'est du gaz carbonique, ou dioxyde de carbone CO_2 . L'équation-bilan s'écrit :



L'acide chlorhydrique attaque le calcaire $CaCO_3$ avec dégagement de dioxyde de carbone CO_2 .



33.4 acidité — pH

33.4.1 concentration $[H_3O^+]$ et acidité

Les réactions précédentes sont d'autant plus vives que la solution est plus acide, c'est-à-dire que la concentration en ions hydronium, notée $[H_3O^+]$, est grande.

Chez le droguiste on trouve des solutions très concentrées, appelées « esprit de sel », dont la concentration $[H_3O^+]$ est d'environ $10 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$. Elles permettent, entre autres, d'attaquer le ciment qui adhère à la surface des carrelages nouvellement posés.

Dans les laboratoires, on utilise généralement des solutions plus diluées. Une solution de concentration $[H_3O^+] = 10^{-1} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$ est plus acide qu'une solution de concentration $[H_3O^+] = 10^{-2} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$.

33.4.2 définition du pH

L'usage des puissances négatives de 10 pour estimer l'acidité d'une solution diluée parut peu pratique aux chimistes. C'est pour cette raison qu'au début du siècle le chimiste danois Sørensen a introduit la notion de pH dont la définition est la suivante :

- Le pH d'une solution aqueuse diluée et sa concentration en ions hydronium sont liés par la relation :

$$[H_3O^+] = 10^{-pH} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$$

Le pH est donc l'exposant, changé de signe, de la puissance de 10 qui mesure la concentration $[H_3O^+]$ en $\text{mol} \cdot \ell^{-1}$.

Par exemple, si $[H_3O^+] = 10^{-3} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$, $pH = 3$,

si $[H_3O^+] = 10^{-1} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$, $pH = 1$.

Quand la concentration $[H_3O^+]$ augmente, nous voyons que le pH diminue.

- Une solution est d'autant plus acide que sa concentration $[H_3O^+]$ est grande et son pH faible.

33.4.3 mesure du pH

Un pHmètre (voir fiche technique) est un appareil qui permet de mesurer le pH d'une solution aqueuse.

Les pHmètres courants permettent de déterminer le pH à 0,1 unité près et parfois 0,05 unité si l'on procède très soigneusement. Aussi pour évaluer la valeur du pH se contente-t-on d'un chiffre après la virgule : 3,2 et non 3,18762..., par exemple!



3. pHmètre en fonctionnement.

Application 1 :

Lors d'une mesure du pH d'une solution d'acide chlorhydrique, un pHmètre indique :

$$\text{pH} = 3,7.$$

Quelle est la concentration $[\text{H}_3\text{O}^+]$ de cette solution ?

Par définition du pH :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-3,7} \text{ mol.}\ell^{-1}.$$

Une calculatrice permet d'effectuer ce calcul dont le résultat doit être compris entre 10^{-3} et 10^{-4} . Afficher 3.7; appuyer sur +/- : -3.7; appuyer sur 2ndF puis sur log ; s'affiche la valeur de la concentration : 0.000199526.

Arrondir :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = 2 \cdot 10^{-4} \text{ mol.}\ell^{-1}.$$

Application 2 :

Quel est le pH des solutions suivantes telles que :

1/ $[\text{H}_3\text{O}^+] = 0,01 \text{ mol.}\ell^{-1}$?

2/ $[\text{H}_3\text{O}^+] = 5 \cdot 10^{-3} \text{ mol.}\ell^{-1}$?

1/ Nous pouvons écrire

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = 0,01 = 10^{-2} \text{ mol.}\ell^{-1};$$

donc

$$\text{pH} = 2.$$

2/ Pour $[\text{H}_3\text{O}^+] = 5 \cdot 10^{-3} \text{ mol.}\ell^{-1}$, il est plus difficile de mettre ce terme sous la forme $10^{-\text{pH}}$. Mais une calculatrice permet de calculer l'exposant pH. Afficher $5 \cdot 10^{-3}$ en appuyant sur 5 puis EXP puis 3 et enfin +/- . Appuyer sur log : -2.301; appuyer sur +/- ; s'affiche la valeur du pH : 2.301. Arrondir le résultat au dixième :

$$\text{pH} = 2,3.$$

33.5 pH d'une solution d'acide chlorhydrique

33.5.1 expériences

Considérons une solution d'acide chlorhydrique de concentration C : elle a été obtenue en dissolvant C moles de chlorure d'hydrogène HCl pour 1 ℓ de solution. A l'aide d'un pHmètre, mesurons le pH de solutions de différentes concentrations. On obtient :

C (mol. ℓ^{-1})	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
pH	0,2	1,1	2,0	3,0	4,0	5,0

Pour des concentrations plus faibles, les mesures sont très difficiles à réaliser car toute trace d'impureté modifie la valeur du pH. Nous reviendrons plus loin sur ce cas.

33.5.2 interprétation

En supposant que la relation :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}} \text{ mol.}\ell^{-1}$$

soit applicable dans tous les cas étudiés, calculons la concentration $[\text{H}_3\text{O}^+]$ dans les différentes solutions.

C (mol. ℓ^{-1})	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
pH	0,2	1,1	2,0	3,0	4,0	5,0
$[\text{H}_3\text{O}^+]$ (mol. ℓ^{-1})	$10^{-0,2}$ soit 0,63	$10^{-1,1}$ soit $0,8 \cdot 10^{-1}$	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}

Nous observons que deux cas peuvent se présenter :

- Pour les solutions dont la concentration C est comprise environ entre $10^{-2} \text{ mol.}\ell^{-1}$ et $10^{-5} \text{ mol.}\ell^{-1}$, la relation :

$$C = [\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}} \text{ mol.}\ell^{-1}$$

est bien vérifiée. 1 litre de solution obtenue en dissolvant C moles de chlorure d'hydrogène dans de l'eau contient donc C moles d'ions hydronium H_3O^+ (et naturellement la même quantité d'ions chlorure Cl^-).

Ce résultat s'explique simplement si on admet que toutes les molécules de chlorure d'hydrogène réagissent sur l'eau pour donner des ions selon la réaction :



- Pour les solutions dont la concentration C est supérieure à $10^{-2} \text{ mol.}\ell^{-1}$, la relation $C = 10^{-\text{pH}} \text{ mol.}\ell^{-1}$ est d'autant moins bien vérifiée que C est plus grand. Cette relation donne cependant un bon ordre de grandeur du pH de la solution.

L'une des raisons qui expliquent ce désaccord est que, contrairement au cas précédent, toutes les molécules HCl ne réagissent pas sur l'eau lorsque C est grand. Une autre raison est que le pH mesuré au pHmètre ne satisfait plus, aux fortes concentrations, à la relation de définition $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}} \text{ mol.}\ell^{-1}$.

33.6 pH de l'eau pure

33.6.1 résultats expérimentaux

Considérons l'eau du robinet : c'est, en principe, de l'eau pure au sens biologique du terme, mais ce n'est pas un corps pur. Elle contient de nombreux corps dissous : des gaz tels que le diazote N_2 , le dioxygène O_2 , le dioxyde

de carbone CO_2 , des ions comme l'ion chlorure Cl^- , l'ion magnésium Mg^{2+} , l'ion calcium Ca^{2+} ... Selon la nature et la quantité des corps dissous, le pH n'a pas la même valeur.

Afin d'obtenir de l'eau pure, on peut effectuer une distillation. Mais une simple distillation ne suffit pas. Il faut opérer à l'abri de l'air, en utilisant des récipients en silice, et répéter les distillations. On peut obtenir ainsi de l'eau très pure dont on détermine, à une température donnée(*), le pH.

- A 25°C le pH de l'eau pure est égal à 7,0.

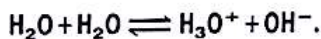
Si le pH de l'eau pure est égal à 7, c'est que l'eau pure contient $10^{-7} \text{ mol.}\ell^{-1}$ d'ions H_3O^+ .

Quelle est l'origine de ces ions? Comment est maintenue la neutralité électrique globale?

33.6.2 interprétation

L'eau pure contient donc des ions H_3O^+ dispersés parmi les molécules d'eau. D'où proviennent ces ions alors que l'eau pure est réputée ne contenir que des molécules d'eau?

On admet qu'au hasard des chocs intermoléculaires, quelques molécules H_2O réagissent selon :



C'est le phénomène de dissociation ionique de l'eau, ou autoprotolyse de l'eau.

La réaction s'écrit avec une flèche à double sens. En effet une flèche simple \rightarrow indiquerait que toutes les molécules d'eau se dissocient! C'est loin d'être le cas comme le montre l'application 4. Seule une infime minorité des molécules H_2O se dissocient. Par ailleurs, si pendant un certain temps quelques nouvelles paires de molécules H_2O viennent à se dissocier, dans le même temps le même nombre de paires d'ions hydronium H_3O^+ et hydroxyde OH^- se recombinent pour reformer des molécules d'eau : on dit qu'il y a un équilibre chimique.



4. Cette eau limpide n'est pas pure...

Notons bien que, comme le montre la réaction précédente, dans l'eau pure il y a autant d'ions hydronium H_3O^+ que d'ions hydroxyde OH^- :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = [\text{OH}^-] = 10^{-7} \text{ mol.}\ell^{-1} \text{ (à 25°C).}$$

Remarque : L'eau pure, malgré la présence des ions H_3O^+ , n'est pas acide; les ions OH^- (nous y reviendrons) sont là pour «compenser» l'effet des ions H_3O^+ . L'eau pure (à 25°C) est un milieu «neutre».

33.7 pH des solutions très diluées d'acide chlorhydrique

33.7.1 résultats expérimentaux

Considérons des solutions très diluées d'acide chlorhydrique, dont les concentrations C sont inférieures à $10^{-5} \text{ mol.}\ell^{-1}$.

Les mesures de pH sont alors très délicates car de petites quantités d'impuretés suffisent à fausser les résultats. Seuls certains laboratoires spécialisés sont équipés pour les effectuer. Le tableau suivant présente les valeurs obtenues à 25°C :

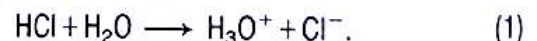
C ($\text{mol.}\ell^{-1}$)	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
pH	5,0	6,0	6,8	7,0	7,0

Ainsi :

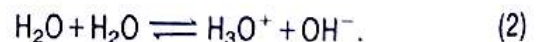
- Quelle que soit la concentration C d'une solution d'acide chlorhydrique à 25°C, son pH est toujours inférieur ou égal à 7 et la concentration en ions hydronium $[\text{H}_3\text{O}^+]$ est toujours supérieure ou égale à $10^{-7} \text{ mol.}\ell^{-1}$.

33.7.2 interprétation

Nous avons noté (cf. paragraphe 33.5) qu'en solution diluée toutes les molécules de chlorure d'hydrogène dissous réagissent sur l'eau selon :



Cette propriété demeure aux très faibles concentrations. Mais simultanément la solution est le siège de l'auto-protolyse de l'eau :



La solution comporte ainsi toujours deux sources d'ions H_3O^+ .

Pour des concentrations supérieures ou égales à $10^{-6} \text{ mol.}\ell^{-1}$, l'apport de (1) reste très largement prépondérant devant l'apport de (2) que l'on peut négliger; dans ce cas, on a donc :

$$C \approx [\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}} \text{ mol.}\ell^{-1} \quad (C \geq 10^{-6} \text{ mol.}\ell^{-1}).$$

(*) On constate que le pH décroît légèrement lorsque la température s'élève.

Mais pour de très faibles concentrations (1) et (2) ont des apports comparables. Lorsque la source (1) tend à se tarir, l'apport de (2) devient semblable à ce qu'il est dans l'eau pure. Le résultat de ce double apport est que, quelle que soit C , même très petite, la concentration $[\text{H}_3\text{O}^+]$ reste supérieure à $10^{-7} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$ (à 25°C). Le

pH de la solution est donc toujours inférieur à 7. On notera aussi que dans la solution d'acide chlorhydrique, même très diluée, la concentration $[\text{H}_3\text{O}^+]$ est toujours supérieure à la concentration $[\text{OH}^-]$ puisque les ions OH^- proviennent de la seule réaction d'autoprotolyse de l'eau.

Fiche technique

le pHmètre

Le pHmètre est un appareil de mesure qui permet de déterminer le caractère acide ou basique d'une solution en mesurant son pH. Il est constitué par un ensemble d'éléments qui forment une chaîne électronique (fig. 5).

• Le capteur

Le capteur est constitué par deux électrodes différentes (fig. 5 et photo 6) qui trempent dans la solution dont on veut mesurer le pH. L'une des électrodes est sensible au pH de la solution étudiée : c'est couramment une électrode de verre. L'autre est une électrode de référence. Désignons par A l'électrode de verre, par B l'électrode de référence. L'ensemble (électrode A , solution, électrode B) constitue une pile, dipôle actif (A, B), de f.é.m. E et de résistance interne r . L'intérêt de cette pile réside dans le fait que la f.é.m. E est fonction affine du pH :

$$E = a + b \cdot \text{pH}$$

a et b sont des constantes qui peuvent être déterminées expérimentalement. Un constructeur donne par exemple :

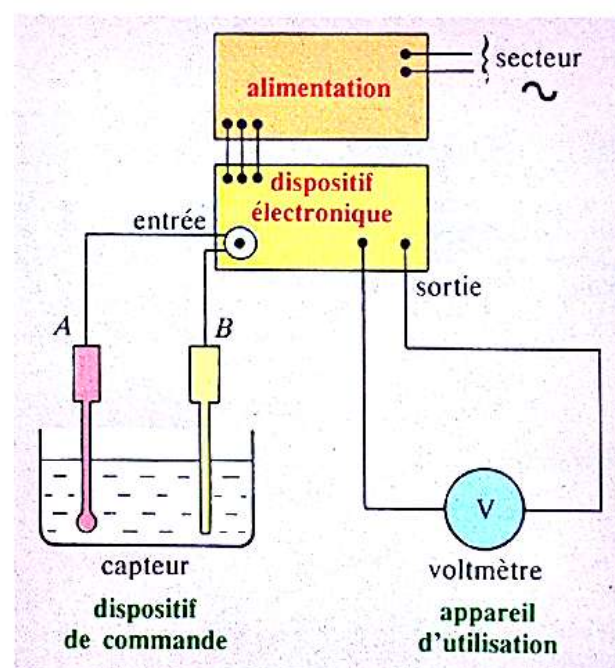
$$E = 0,406 - 0,058 \text{ pH} \quad \text{en volt.}$$

Il suffit donc de mesurer la f.é.m. E pour calculer ensuite le pH de la solution.

Notons que pour diminuer l'encombrement du capteur, les constructeurs proposent des électrodes doubles (photo 7). Les deux électrodes, verre et référence, sont associées pour former une sonde unique de laquelle part un câble coaxial : le fil central est relié à l'électrode de verre, le fil externe à l'électrode de référence.

• Le dispositif électronique

Il s'avère que la résistance interne r du couple d'électrodes immergées est tellement grande (plusieurs centaines de mégohms) qu'un voltmètre

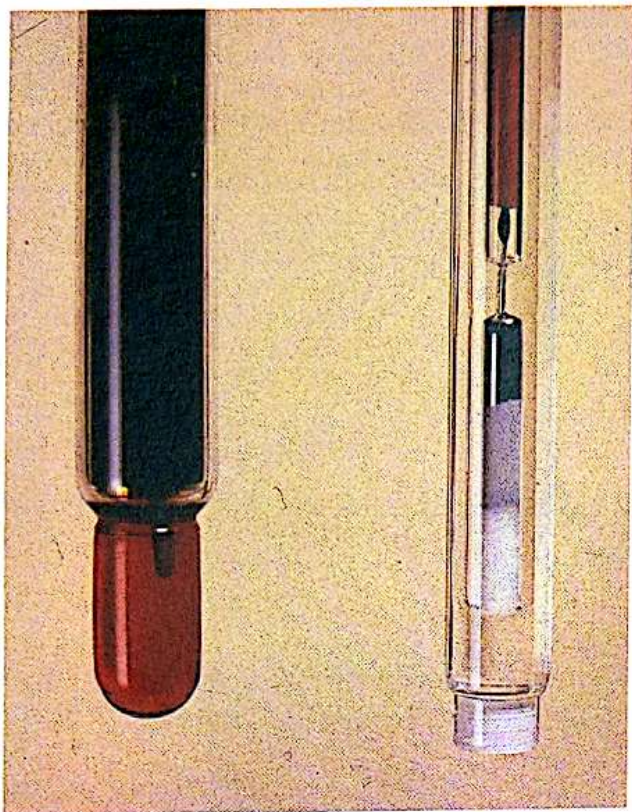


5. Un pHmètre est constitué par une chaîne électronique.

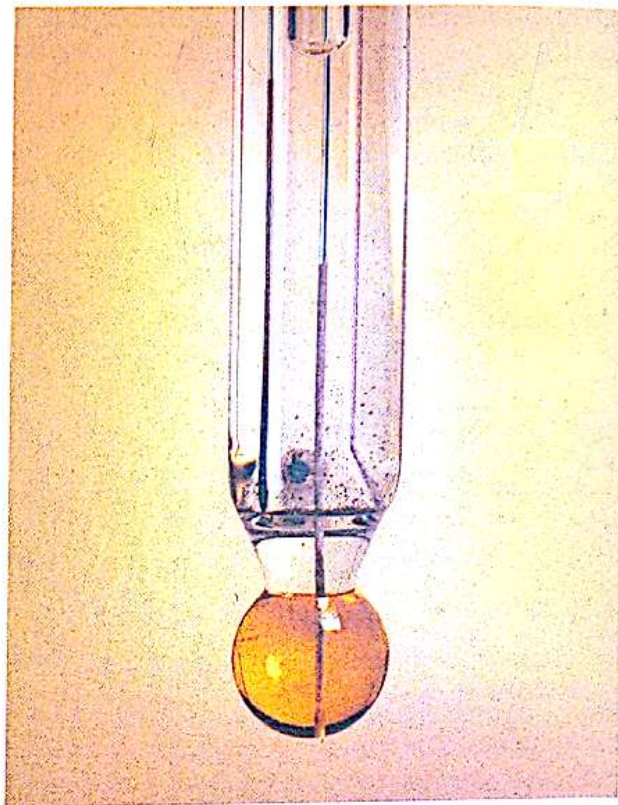
ordinaire, même de bonne qualité ($20\,000 \Omega \cdot \text{V}^{-1}$), n'est pas adapté pour mesurer la f.é.m. E d'une telle pile (voir chapitre 12, fiche expérimentale 1). Il convient d'intercaler entre le capteur (*dispositif de commande*) et le voltmètre (*dispositif d'utilisation*) un *dispositif électronique d'adaptation*. Ce dispositif électronique, amplificateur de faible résistance de sortie (adaptée au voltmètre) et de forte résistance d'entrée (adaptée au capteur), est alimenté par le secteur.

L'ensemble, dispositif électronique et voltmètre, constitue un *voltmètre électronique* dont la résistance peut dépasser $10^{12} \Omega$.

Un pHmètre est donc un voltmètre électronique adapté à la mesure du pH; son cadran est gradué en pH.



6. A gauche l'électrode de verre, à droite l'électrode de référence. L'ensemble constitue une pile dont la f.é.m. est fonction affine du pH de la solution dans laquelle il est plongé.



7. Électrodes combinées. L'électrode de verre est au centre et l'électrode de référence à l'extérieur. Remarquez les deux fils qui assurent le contact électrique avec chaque électrode.

Application 3 :

On prélève 2 cm^3 d'une solution d'acide chlorhydrique de concentration $C = 1 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$. Ces 2 cm^3 sont introduits dans une fiole de 2 litres. On ajoute de l'eau pour obtenir 2 litres de solution diluée d'acide chlorhydrique. Quel est le pH de la solution diluée ?

Calculons n , quantité d'ions H_3O^+ ou Cl^- contenus dans le volume $V_1 = 2 \text{ cm}^3 = 2 \cdot 10^{-3} \ell$ de solution de concentration $C_1 = 1 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$:

$$n = C_1 \cdot V_1 = 1 \times 2 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ mol.}$$

Après dilution, ces n moles se retrouvent dans un volume $V_2 = 2 \ell$. Calculons la nouvelle concentration C_2 :

$$C_2 = \frac{n}{V_2} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{2} = 10^{-3} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}.$$

Pour une telle dilution nous avons :

$$C_2 = [\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}} \text{ mol} \cdot \ell^{-1};$$

donc $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-3} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$

et $\text{pH} = 3.$

Application 4 :

Calculer le rapport de la quantité n' d'eau dissociée à la quantité n initiale d'eau, dans l'eau pure à 25°C .

Calculons n pour 1 litre d'eau pure.

La masse molaire de l'eau est $M = 18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

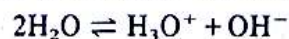
La masse de 1 ℓ d'eau est $m = 1000 \text{ g}$.

$$n = \frac{m}{M} = \frac{1000}{18} \approx 55 \text{ mol.}$$

A 25°C , $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-7} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$. La quantité d'ions H_3O^+ dans 1 ℓ d'eau pure est donc :

$$n_{\text{H}_3\text{O}^+} = [\text{H}_3\text{O}^+] \cdot V = 10^{-7} \cdot 1 = 10^{-7} \text{ mol.}$$

La réaction de dissociation de l'eau :



montre que 2 molécules H_2O disparaissent pour former 1 ion H_3O^+ . On a donc :

$$n' = 2n_{\text{H}_3\text{O}^+} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ mol.}$$

Le rapport cherché est donc égal à :

$$\frac{n'}{n} = \frac{2 \cdot 10^{-7} \times 18}{10^3} = 3,6 \cdot 10^{-9}.$$

Moins de 4 molécules sur 1 milliard sont dissociées dans l'eau pure à 25°C ! La réaction de dissociation ionique de l'eau est vraiment *très limitée*.

Faire le point

- Quelle est la structure électronique de la molécule de chlorure d'hydrogène?
- Quel est l'état physique du chlorure d'hydrogène dans les conditions normales de température et de pression?
- Décrire les phénomènes intervenant lors de la dissolution du chlorure d'hydrogène dans l'eau.
- Quels sont les produits d'électrolyse de la solution d'acide chlorhydrique?
- Comment caractérise-t-on la présence d'ions chlorure dans une solution?
- Écrire l'équation-bilan de la réaction de la solution chlorhydrique sur l'aluminium et sur le cuivre.
- Quelle est la relation de définition du pH?
- Qu'appelle-t-on autoprotolyse de l'eau? Quelles sont les caractéristiques de cette réaction?
- Quel est le pH de l'eau pure à 25 °C? Comparer les concentrations en ions hydronium et hydroxyde dans l'eau pure.
- Quel est le pH d'une solution chlorhydrique à $10^{-2} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$? Même question pour une solution à $10^{-9} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$.

Dans tous les exercices, on a abrégé « conditions normales de température et de pression » en « C. N. T. P. ».

33.1 Donner les concentrations en $\text{mol} \cdot \ell^{-1}$ des ions contenus dans des solutions d'acide chlorhydrique dont on a relevé le pH : solution A : pH=2; solution B : pH=3,5; solution C : pH=4,2.

33.2 On dispose de quatre solutions d'acide chlorhydrique A, B, C, D, de concentrations connues :

$$C_A = 10^{-2} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}; \quad C_C = 0,5 \text{ g} \cdot \ell^{-1}; \\ C_B = 3 \cdot 10^{-4} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}; \quad C_D = 0,365 \text{ g} \cdot \ell^{-1}.$$

Quel est leur pH?

33.3 Quel volume de chlorure d'hydrogène gazeux doit-on utiliser pour obtenir 1 ℓ de solution d'acide chlorhydrique de pH=2? (volume molaire = $24 \ell \cdot \text{mol}^{-1}$.)

33.4 Combien de litres de chlorure d'hydrogène (mesuré dans les C. N. T. P.) doit-on utiliser pour obtenir 150 cm^3 d'une solution d'acide chlorhydrique de pH=1,5?

33.5 A 50 cm^3 d'une solution d'acide chlorhydrique à $0,1 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$, on ajoute 950 cm^3 d'eau. Calculer, dans la solution obtenue, les concentrations en ions Cl^- et en ions H_3O^+ , ainsi que le pH de cette solution.

33.6 On dispose d'une solution d'acide chlorhydrique à $0,8 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$. On veut préparer 4 litres d'une solution à $0,01 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$. Comment faut-il procéder? Quel est le pH de la solution obtenue?

33.7 On mélange 50 cm^3 d'une solution d'acide chlorhydrique de pH=2 et 100 cm^3 d'une solution d'acide chlorhydrique de pH=3. Quelle est la concentration de la solution obtenue? Calculer les concentrations $[\text{Cl}^-]$ et $[\text{H}_3\text{O}^+]$. Quel est le pH de la solution?

33.8 Une piscine a les dimensions suivantes : longueur : 25 m; largeur : 6 m; profondeur : 2,5 m. Elle est remplie d'une eau dont le pH est voisin de 5,5. Une

bouteille de 250 cm^3 contenant une solution d'acide chlorhydrique à $12 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$ se déverse dans la piscine. Y plongerez-vous?

33.9 On dispose d'une solution d'acide chlorhydrique obtenue en dissolvant dans l'eau pure 1 ℓ de chlorure d'hydrogène, mesuré dans les C. N. T. P. Le volume de la solution est amené à 1 ℓ .

1/ Calculer la concentration de la solution et son pH.

2/ On réalise une solution aqueuse de chlorure de sodium de volume 2 ℓ et contenant 10 g de ce corps. Quelle est la concentration de la solution? Quel devrait être son pH? En réalité, il est compris généralement entre 5 et 6. Pourquoi?

3/ On mélange les deux solutions obtenues. Calculer les concentrations en ions H_3O^+ , Cl^- et Na^+ . Quel est le pH de la solution? La neutralité électrique de la solution est-elle vérifiée?

33.10 On veut obtenir 5 ℓ de dihydrogène, mesurés dans les conditions normales, en attaquant le zinc, le fer ou l'aluminium par une solution d'acide chlorhydrique. Calculer les masses de chacun de ces métaux qui passeront à l'état d'ions.

33.11 Dans les laboratoires des lycées, la préparation de petites quantités de dihydrogène se fait souvent par action sur le métal zinc d'une solution d'acide chlorhydrique.

1/ Écrire l'équation-bilan de la réaction.

2/ Quelle masse de zinc faut-il employer pour obtenir 500 cm^3 de dihydrogène dans les conditions normales de température et de pression?

3/ Quel volume minimal d'une solution d'acide à $2 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$ faut-il utiliser?

33.12 Pour rechercher les affleurements de roches calcaires, les géologues utilisent un acide. Le marbre, la craie sont des pierres calcaires. Le calcaire, ou carbonate de calcium, a pour formule CaCO_3 . Le carbonate, solide, est attaqué par l'acide; du dioxyde de carbone se dégage et les ions Ca^{2+} passent en solution.

1/ Écrire l'équation-bilan de la réaction.

2/ Quelle masse de marbre blanc, supposé être du carbonate de calcium pur, faut-il prendre pour préparer 20 ℓ de dioxyde de carbone (mesurés dans les C. N. T. P.)?

33.13 On électrolyse, entre des électrodes de graphite, une solution d'acide chlorhydrique de concentration égale à $2 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$.

1/ Quelle réaction se produit à la cathode? L'intensité du courant étant maintenue égale à 1,5 A, au bout de combien de temps aura-t-on recueilli un volume de gaz égal à 0,75 ℓ dans les C. N. T. P.?

2/ Quelle est la quantité d'électricité nécessaire? Quel est le volume de dichlore (mesuré dans le C. N. T. P.) obtenu à l'anode?

3/ Le volume de solution d'acide chlorhydrique utilisé est de 600 cm^3 . Quelle est la concentration de la solution lorsqu'on arrête l'électrolyse?

33.14 A 0 °C, le pH de l'eau est de 7,5; à 50 °C, il est de 6,6. Calculer, pour ces deux températures, les concentrations $[\text{H}_3\text{O}^+]$ et $[\text{OH}^-]$. Déterminer la fraction de molécules d'eau ayant subi la réaction d'autoprotolyse.

L'hydroxyde de sodium et sa solution aqueuse

34.1 le corps pur NaOH

34.1.1 aspect

L'hydroxyde de sodium, vendu dans le commerce sous le nom de «soude caustique», se présente le plus souvent sous forme de paillettes ou de pastilles. C'est un solide blanc, plus dense que l'eau : sa masse volumique est supérieure à $2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Sa température de fusion est peu élevée : $318 \text{ }^\circ\text{C}$.

34.1.2 structure

L'hydroxyde de sodium solide est constitué par un empilement ordonné d'ions sodium Na^+ et d'ions hydroxyde OH^- : c'est un solide ionique. Il est arbitraire d'isoler dans le cristal un couple particulier d'ions Na^+OH^- . Néanmoins pour prendre en compte le fait qu'il y a un ion Na^+ pour un ion OH^- , nous écrivons la formule de la soude solide NaOH.

34.2 la solution aqueuse de soude

34.2.1 affinité de la soude pour l'eau

La soude est très avide d'eau : des pastilles de soude, abandonnées à l'air, deviennent «déliquescentes» (photo 1). La soude retient à son contact la vapeur d'eau atmosphérique; celle-ci se condense et forme d'abord une pellicule d'eau liquide à la surface des pastilles. Petit à petit, les pastilles se dissolvent dans l'eau de condensation et l'on obtient une solution très concentrée de soude dans l'eau. Cette affinité de la soude pour l'eau est utilisée pour dessécher les gaz, du moins ceux qui ne réagissent pas chimiquement sur la soude.

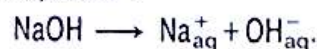
Attention : A cause de ses propriétés déshydratantes, la soude est «caustique» : la peau, au contact des pastilles de soude ou d'une solution de soude subit une forte déshydratation. Il faut donc manipuler la soude avec précaution.



1. L'hydroxyde de sodium cristallisé est déliquescent : il absorbe l'humidité de l'air et se dissout.

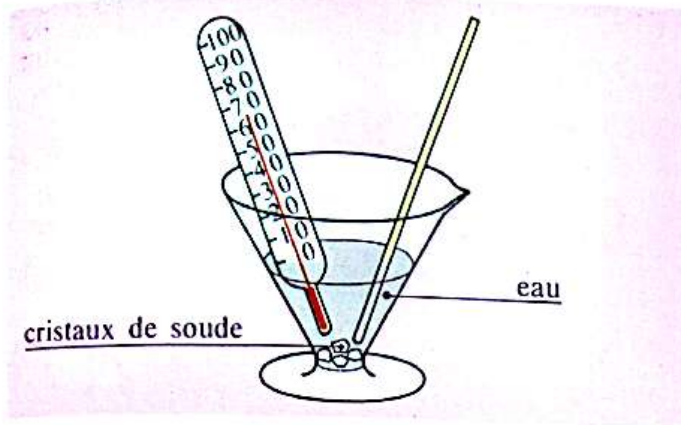
34.2.2 dissolution de la soude dans l'eau

La soude se dissout facilement dans l'eau : il y a dislocation du cristal ionique, hydratation des ions Na^+ et OH^- et dispersion des ions hydratés Na_{aq}^+ et OH_{aq}^- parmi les molécules d'eau. Le bilan de cette dissolution est donné par l'équation :



La faible énergie de cohésion du cristal de soude (la température de fusion est peu élevée) et la forte énergie d'hydratation de l'ion OH^- rendent cette dissolution très exothermique (fig. 2).

Remarque : Pour simplifier l'écriture, les ions seront notés Na^+ et OH^- même lorsqu'ils sont hydratés.



2. La dissolution de la soude cristallisée s'accompagne d'un important dégagement de chaleur.

34.2.3 électrolyse de la solution de soude

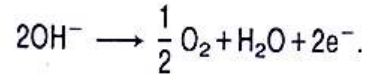
L'électrolyse (voir fiche expérimentale) confirme la présence d'ions dans la solution qui conduit bien le courant.

L'électrolyse s'accompagne :

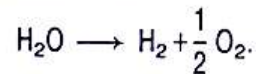
- d'un dégagement de gaz dihydrogène à la cathode. Il s'avère que les ions Na^+ , très stables, « refusent » de réagir à la cathode; des molécules d'eau réagissent à leur place selon :



- d'un dégagement de gaz dioxygène à l'anode provenant des ions OH^- :



Nous remarquons que cette électrolyse est en fait celle de l'eau; en effet le bilan des deux transformations qui se déroulent aux électrodes est :



La quantité de soude dans l'électrolyseur reste donc constante.

34.3 propriétés de la solution aqueuse de soude

Cette solution possède les propriétés des ions qu'elle contient : ions Na^+ et OH^- hydratés.

34.3.1 propriétés des ions Na^+

L'ion Na^+ est très stable, difficile à transformer. Dans une flamme, il émet une lumière jaune caractéristique (voir photo 10, page 306).

34.3.2 propriétés des ions hydroxyde OH^-

Une solution de soude est dite **basique**. Ce sont les ions OH^- qui confèrent à cette solution ses propriétés.

1. Action sur les indicateurs colorés

Quelle est l'action des ions OH^- sur les trois indicateurs colorés utilisés dans la leçon précédente? La fiche expérimentale (page suivante) montre que :

- l'hélianthine est jaune (même couleur avec l'eau pure);
- le bleu de bromothymol vire au bleu;
- la phénolphtaléine vire au violet.

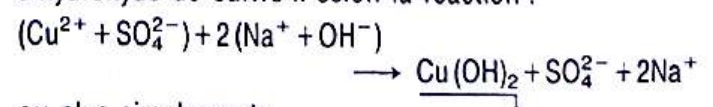
Nous admettrons que les ions OH^- sont responsables de ce changement de teinte (virage). Les ions Na^+ sont hors de cause puisque, nous l'avons déjà vu, l'eau salée (Na^+ et Cl^-) ne provoque aucun virage.

	eau pure	solution basique assez concentrée
Hél	jaune	jaune
BB	vert	bleu
PP	incoloré	violet

3. Action des ions hydroxydes OH^- sur les indicateurs colorés : hélianthine (Hél), bleu de bromothymol (BB) et phénolphtaléine (PP).

2. Action sur certains ions métalliques en solution

Les ions OH^- réagissent avec la plupart des ions métalliques, tels Cu^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} (voir fiche expérimentale). Par exemple une solution de soude (Na^+ et OH^-) versée dans une solution de sulfate de cuivre II (Cu^{2+} et SO_4^{2-}) donne un précipité bleu clair gélatineux d'hydroxyde de cuivre II selon la réaction :



ou plus simplement :



Toutes les solutions contenant des ions hydroxyde OH^- en quantité suffisante présentent ces propriétés communes.

Fiche expérimentale

propriétés de la solution de soude

• Électrolyse de la solution de soude

Réalisons le montage ci-contre. Dès que le circuit est fermé, la lampe brille, indiquant le passage d'un courant électrique, et des dégagements gazeux apparaissent sur les électrodes. Recueillons ces gaz.

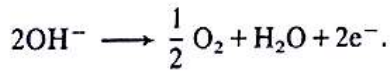
Au bout d'un certain temps nous constatons que le volume gazeux recueilli à la cathode est environ le double de celui obtenu à l'anode.

Nous identifions facilement ces deux gaz; le gaz recueilli à l'anode rallume une bûchette ne présentant plus qu'un point incandescent : c'est du dioxygène O_2 . Celui obtenu à la cathode brûle avec une légère détonation : c'est du dihydrogène H_2 .

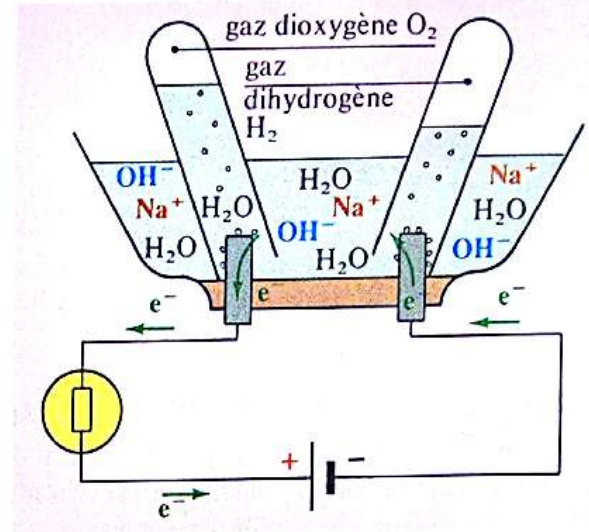
Interprétation

Sous l'influence de la tension appliquée entre les électrodes, les ions de la solution acquièrent un déplacement d'ensemble : les anions OH^- migrent vers l'anode, les cations Na^+ vers la cathode.

A l'anode, les ions OH^- sont contraints de perdre un électron selon le bilan :



A la cathode, arrivent les électrons « poussés » par le générateur. Mais comme nous l'avons observé



lors de l'électrolyse de la solution aqueuse de chlorure de sodium, les ions Na^+ n'ont aucune tendance à capter ces électrons. En fait, ce sont les molécules d'eau qui se voient forcées de les accepter. Elles subissent la réaction :



• Action sur les indicateurs colorés

Reprenons les indicateurs colorés du chapitre précédent : hélianthine, bleu de bromothymol et phénolphtaléine. Versons-en quelques gouttes dans de l'eau pure puis dans une solution de soude. Chaque indicateur adopte une teinte particulière. Si nous mettons ces indicateurs dans une solution de soude extrêmement diluée, la phénolphtaléine reste incolore comme dans l'eau pure alors que le bleu de bromothymol devient bleu.

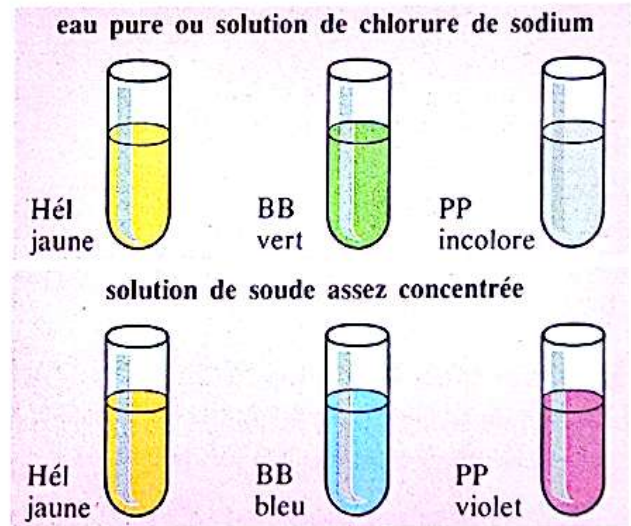
Le bleu de bromothymol permet de différencier une solution basique de l'eau pure ou d'une solution neutre. La phénolphtaléine permet de reconnaître une solution basique assez concentrée.

L'hélianthine ne permet aucune distinction entre solutions basique et neutre.

• Action sur certains ions métalliques

Nous disposons de solutions contenant différents ions métalliques :

- solution de sulfate de cuivre II : Cu^{2+} et SO_4^{2-} ,
- solution de sulfate de fer II : Fe^{2+} et SO_4^{2-} ,
- solution de chlorure de fer III : Fe^{3+} et $3Cl^-$,
- solution de nitrate de zinc : Zn^{2+} et $2NO_3^-$,
- solution de sulfate d'aluminium : $2Al^{3+}$ et $3SO_4^{2-}$.

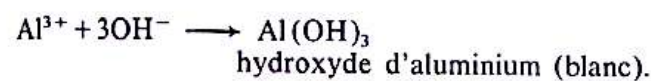
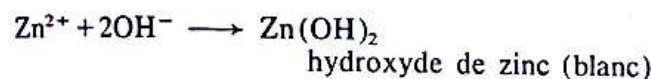
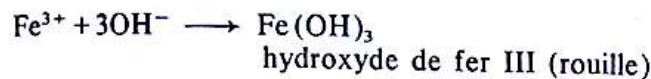
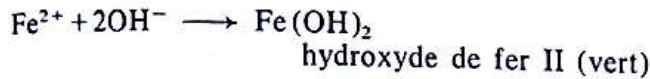
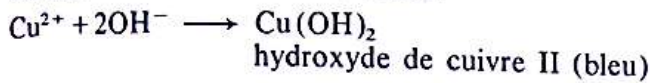


Dans une prise d'essai de ces solutions versons délicatement, goutte à goutte, une solution de soude diluée : nous voyons se former des précipités colorés ou blancs.

Nous savons, ou nous pouvons vérifier, que les ions sodium Na^+ peuvent coexister en solution, sans précipiter, avec les ions SO_4^{2-} ou NO_3^- ou Cl^- . Ces ions ne sont donc pas responsables de

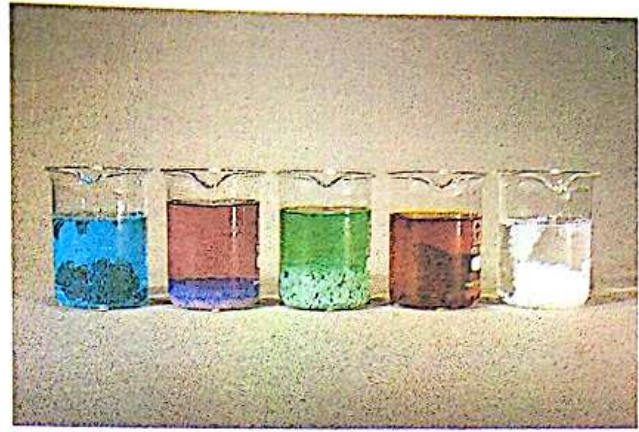
ces précipités. En revanche les ions hydroxyde OH^- ont une grande affinité pour certains ions métalliques : ils s'associent avec ces ions pour former un solide qui quitte la solution sous forme de précipité.

Le bilan de ces réactions s'écrit :



Dans ces réactions, les ions Na^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- ou Cl^- sont « spectateurs ».

Une solution de soude provoque la précipitation de certains hydroxydes.



4. Précipitation de divers hydroxydes métalliques par la soude. De gauche à droite : hydroxydes de cuivre II, cobalt, fer II, fer III et aluminium.

Remarque : Si l'on ajoute un excès de soude ou de la soude trop concentrée, certains précipités d'hydroxydes se redissolvent. Nous verrons cela au chapitre 37.

34.4 pH d'une solution de soude

34.4.1 pH et concentration

A l'aide d'un pHmètre il est possible de mesurer le pH de solutions de soude de différentes concentrations C . Des résultats sont rassemblés ci-dessous :

C (mol. ℓ^{-1})	10^{-2}	10^{-3}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
pH	12,0	11,0	9,0	8,0	7,2	7,0

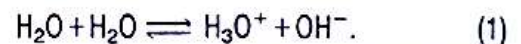
- Le pH d'une solution de soude est toujours supérieur à 7. Il en est de même pour toutes les solutions basiques.

Nous savons que le pH est lié à la concentration en ions H_3O^+ . La solution de soude, censée ne contenir que des ions Na^+ et OH^- dispersés parmi les molécules d'eau, contient-elle, aussi, des ions H_3O^+ ?

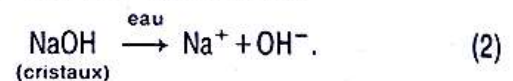
Remarque : La mesure du pH d'une solution concentrée de soude ($C > 10^{-2}$ mol. ℓ^{-1}) nécessite des électrodes spécialement adaptées; par ailleurs, aux fortes concentrations, le pH mesuré ne satisfait plus à la relation de définition $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}}$ mol. ℓ^{-1} . Quant aux mesures relatives aux solutions très diluées, elles ne peuvent être réalisées, comme nous l'avons déjà souligné, que dans des laboratoires spécialisés.

33.4.2 provenance des ions en solution

Les ions hydronium H_3O^+ présents dans la solution de soude ne peuvent provenir que de la dissociation de l'eau. Nous savons que l'eau fournit des ions H_3O^+ et OH^- en quantités égales mais très faibles, du fait de sa dissociation ionique :



La dissolution de la soude, quant à elle, fournit des ions Na^+ et OH^- en quantités égales selon :



Les ions hydroxyde OH^- ont donc une double provenance : dissociation de l'eau et dissolution de la soude. Les ions hydronium H_3O^+ ne proviennent, eux, que de la dissociation de l'eau.

- Dans une solution de soude même très diluée, la concentration $[\text{OH}^-]$ est toujours supérieure à la concentration $[\text{H}_3\text{O}^+]$.

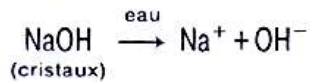
C'est en quelque sorte la propriété symétrique de celle vue, pour la solution d'acide chlorhydrique, au paragraphe 33.7.2.

34.4.3 concentration en soude et $[\text{OH}^-]$

Pour les solutions d'acide chlorhydrique, nous avons négligé les ions H_3O^+ en provenance de l'eau dès que le pH s'écartait suffisamment de 7, par exemple pour pH inférieur ou égal à 6.

De même, pour les solutions de soude, nous négligerons les ions OH^- provenant de la dissociation de l'eau (réaction (1)) dès que le pH sera suffisamment supérieur à 7, par exemple à partir de $\text{pH}=8$.

Dans ces conditions, les ions OH^- proviennent essentiellement de la dislocation des cristaux de soude :



et si C est la concentration de la solution :

$$C = [\text{Na}^+] = [\text{OH}^-].$$

- Dans une solution de soude, la concentration $[\text{OH}^-]$ est égale à la concentration C de soude dissoute (pour $\text{pH} > 8$).

34.5 coexistence d'ions OH^- et H_3O^+

Exploitions les observations effectuées à 25°C sur les solutions de soude (voir tableau précédent) :

- $C = 10^{-2} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$, donc $[\text{OH}^-] = 10^{-2} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$
 $\text{pH} = 12$, donc $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-12} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$
 d'où $[\text{H}_3\text{O}^+] \cdot [\text{OH}^-] = 10^{-14} (\text{mol} \cdot \ell^{-1})^2$.
- $C = 10^{-3} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$, donc $[\text{OH}^-] = 10^{-3} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$
 $\text{pH} = 11$, donc $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-11} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$
 d'où $[\text{H}_3\text{O}^+] \cdot [\text{OH}^-] = 10^{-14} (\text{mol} \cdot \ell^{-1})^2$.
- $C = 10^{-5} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$, donc $[\text{OH}^-] = 10^{-5} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$
 $\text{pH} = 9$, donc $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-9} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$
 d'où $[\text{H}_3\text{O}^+] \cdot [\text{OH}^-] = 10^{-14} (\text{mol} \cdot \ell^{-1})^2$.

Nous constatons que, lorsque la concentration $[\text{OH}^-]$ diminue, la concentration $[\text{H}_3\text{O}^+]$ augmente dans le même rapport : le produit $[\text{H}_3\text{O}^+] \cdot [\text{OH}^-]$ est constant, égal à $10^{-14} (\text{mol} \cdot \ell^{-1})^2$ à 25°C .

Ce résultat illustre une loi de coexistence en solution aqueuse des ions OH^- et H_3O^+ .

- En solution aqueuse, les ions H_3O^+ et OH^- ne peuvent coexister que si le produit de leur concentration reste égal à une constante K_e appelée « produit de dissociation ionique de l'eau » :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] \cdot [\text{OH}^-] = K_e = 10^{-14} (\text{mol} \cdot \ell^{-1})^2 \text{ à } 25^\circ\text{C}.$$

Cette loi s'avère valable pour toutes les solutions aqueuses diluées, quels que soient les corps dissous et leur concentration, et également pour l'eau pure.

Dans le cas de l'eau pure, la réaction d'autoprotolyse (1) montre que :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = [\text{OH}^-].$$

- Or : $[\text{H}_3\text{O}^+] \cdot [\text{OH}^-] = 10^{-14} (\text{mol} \cdot \ell^{-1})^2$,
 soit : $[\text{H}_3\text{O}^+]^2 = [\text{OH}^-]^2 = 10^{-14} (\text{mol} \cdot \ell^{-1})^2$,
 d'où : $[\text{H}_3\text{O}^+] = [\text{OH}^-] = 10^{-7} (\text{mol} \cdot \ell^{-1})^2$,
 et $\text{pH} = 7$.

solutions à 25°C

	acide	neutre	basique	
10^{-1}				10^{-1}
10^{-2}	$[\text{H}_3\text{O}^+]$			10^{-2}
10^{-3}			$[\text{OH}^-]$	10^{-3}
10^{-4}				10^{-4}
10^{-5}				10^{-5}
10^{-6}				10^{-6}
10^{-7}		$[\text{H}_3\text{O}^+]$		10^{-7}
10^{-8}		$[\text{OH}^-]$		10^{-8}
10^{-9}				10^{-9}
10^{-10}				10^{-10}
10^{-11}			$[\text{H}_3\text{O}^+]$	10^{-11}
10^{-12}	$[\text{OH}^-]$			10^{-12}
10^{-13}				10^{-13}

5. Trois exemples de solutions aqueuses à 25°C . On a toujours :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] \cdot [\text{OH}^-] = 10^{-14}.$$

Application 1 :

A 25°C , la mesure du pH d'une solution de soude donne $\text{pH} = 11$. Calculer la concentration en soude de cette solution.

Si $\text{pH} = 11$ alors $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-11} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$.

Or à 25°C : $[\text{OH}^-] \cdot [\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-14} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$.

D'où : $C = [\text{OH}^-] = \frac{10^{-14}}{10^{-11}} = 10^{-3} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$.

Application 2 :

A 25°C , la mesure du pH d'une solution de soude donne $\text{pH} = 11,5$. Calculer la concentration en soude de cette solution.

Comme précédemment on calcule $[\text{H}_3\text{O}^+]$ puis $[\text{OH}^-]$:

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-11,5} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$$

et $[\text{OH}^-] = \frac{10^{-14}}{10^{-11,5}} = 10^{-2,5} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$.

Une calculatrice permet de calculer $10^{-2,5}$.

Afficher $-2,5$; appuyer sur 2nd F puis log. On obtient, après avoir arrondi :

$$C \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}.$$

Application 3 :

A 25 °C, on dissout 0,6 g de soude cristallisée de façon à obtenir 2 litres de solution aqueuse. Quel doit être le pH de cette solution ?

La masse molaire de la soude est :

$$M = 23 + 16 + 1 = 40 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}.$$

Calculons n , quantité de soude contenue dans une masse m de soude :

$$n = \frac{m}{M} = \frac{0,6}{40} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ mol}.$$

Ces n moles sont dissoutes dans un volume $V = 2 \text{ l}$; calculons la concentration C :

$$C = \frac{n}{V} = \frac{1,5 \cdot 10^{-2}}{2} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}.$$

La solution est assez concentrée pour négliger

les ions OH^- qui proviennent de l'eau; donc $C = [\text{OH}^-]$:

$$[\text{OH}^-] = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}.$$

Or à 25 °C :

$$K_e = [\text{H}_3\text{O}^+] \cdot [\text{OH}^-] = 10^{-14} \text{ (mol} \cdot \text{l}^{-1})^2,$$

d'où :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = \frac{10^{-14}}{7,5 \cdot 10^{-3}} = 1,33 \cdot 10^{-12} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1},$$

$$10^{-11} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1} > [\text{H}_3\text{O}^+] > 10^{-12} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$$

et

$$11 < \text{pH} < 12.$$

Une calculatrice permet un calcul plus précis.

Afficher 1,33; appuyer sur EXP; afficher 12; appuyer sur +/-; sur log et enfin sur +/- . On obtient, après avoir arrondi :

$$\text{pH} = 11,9.$$

Fiche technique**les indicateurs colorés****1. Présentation**

Les indicateurs colorés sont des substances qui en solution aqueuse sont sensibles aux ions H_3O^+ ou OH^- . Selon le pH de la solution dans laquelle ils se trouvent, c'est-à-dire selon la concentration $[\text{H}_3\text{O}^+]$ ou $[\text{OH}^-]$, ils adoptent une couleur ou une autre.

Les indicateurs usuels sont l'hélianthine (Hél), le bleu de bromothymol (BB) et la phénolphthaléine (PP).

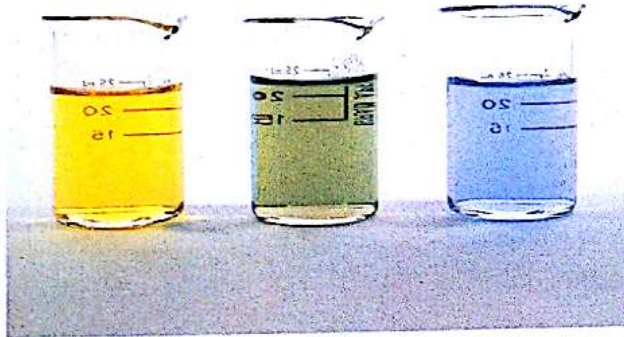
Dans des solutions d'acide chlorhydrique, puis des solutions de soude de concentrations différentes, introduisons quelques gouttes d'un indicateur. Notons sa couleur et mesurons le pH de la solution. Les résultats sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

Prenons l'exemple du bleu de bromothymol (BB). Les teintes prises par cet indicateur en fonction du pH sont les suivantes :

- A $\text{pH} = 7$, la moitié des particules (molécules ou ions) qui constituent le BB donne une coloration jaune, l'autre moitié donne une coloration bleue; l'observateur voit une solution gris-vert : c'est la *teinte sensible* de l'indicateur.
- A $\text{pH} < 6$, plus des 9/10 des particules de BB donne une coloration jaune, le reste une coloration bleue; l'observateur voit une solution jaune : c'est la *teinte acide* de l'indicateur.
- A $\text{pH} > 8$, plus des 9/10 des particules de BB donne une coloration bleue, le reste une coloration jaune; l'observateur voit une solution bleue : c'est la *teinte basique* de l'indicateur.

	solutions acides					neutres		solutions basiques					
pH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Hél	rouge			3	5	jaune							
BB	jaune					6	8	bleu					
PP	incolore							8	10	violet			

Fiche technique (suite)



6. De gauche à droite : les teintes acide, sensible et basique du bleu de bromothymol.

Ainsi la teinte du bleu de bromothymol change entre $\text{pH} = 6$ et $\text{pH} = 8$: c'est le *domaine de virage* de l'indicateur.

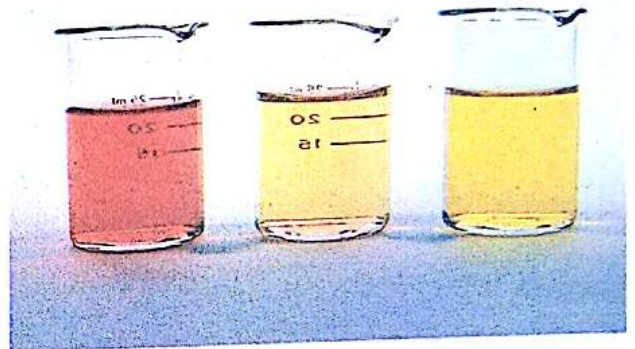
Pour l'hélianthine, le domaine de virage est 3-5; pour la phénolphtaléine 8-10.

2. Utilisation

Les indicateurs colorés ne peuvent se substituer à un pHmètre pour mesurer le pH. Ils permettent seulement de situer le pH d'une solution par rapport à leur zone de virage.

Par exemple, lorsque le BB est nettement bleu, la solution a un pH supérieur à 8; si la PP est mauve, le pH est supérieur à 10.

Attention si l'hélianthine est jaune dans une solution; cela ne veut pas dire que la solution soit



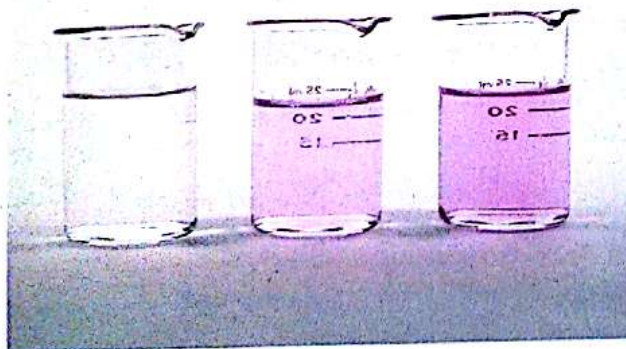
7. De gauche à droite : les teintes acide, sensible et basique de l'hélianthine.

basique, mais que son pH est supérieur à 5 : elle peut être soit acide (si $5 < \text{pH} < 7$), soit neutre (si $\text{pH} = 7$), soit basique si $\text{pH} > 7$.

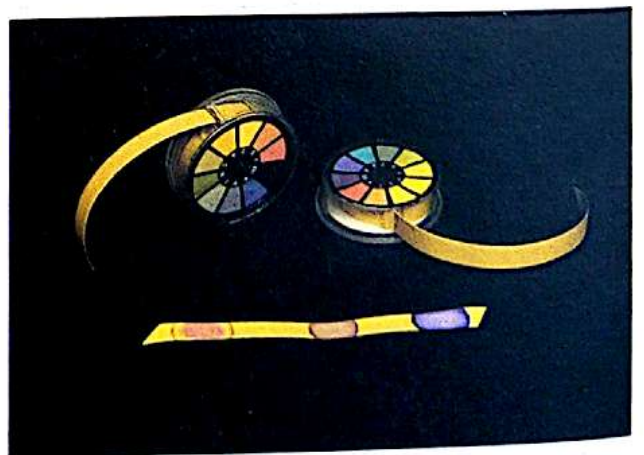
3. Papier pH

Les laboratoires utilisent des papiers indicateurs universels : ils sont imprégnés d'un mélange de plusieurs indicateurs adoptant des teintes différentes qui se superposent au contact d'une solution. La couleur résultante dépend du pH de la solution. Une échelle de teinte (*photo 9*) permet de déterminer approximativement le pH, au mieux à 0,5 unités pH près.

A défaut de pHmètre, ces indicateurs universels permettent un repérage convenable du pH des solutions.



8. De gauche à droite : les teintes acide, sensible et basique de phénolphtaléine.



9. Rouleaux de papier pH. On distingue les nuanciers gradués en unité de pH.

Faire le point

- Quelle est la formule de la soude? Quel est son état physique dans les conditions habituelles de température et de pression?
- Préciser les différentes étapes de la dissolution de la soude dans l'eau. Quel est l'effet thermique de la dissolution?
- La solution de soude est-elle bonne conductrice du courant électrique? Si, oui, expliquer pourquoi et préciser quels ions interviennent dans la conduction électrique.
- Quels sont les phénomènes se déroulant aux électrodes lors de l'électrolyse de la solution de soude? Pourquoi observe-t-on que les volumes de gaz recueillis aux électrodes sont dans un rapport de 2?
- Quelle est l'action de la soude sur une solution de chlorure de fer II?
- Écrire les équations-bilans complètes des réactions entre le sulfate de fer II et la soude, puis entre le chlorure de fer III et la soude.
- A quoi sont dus les ions H_3O^+ présents dans une solution de soude?
- Comparer le pH d'une solution de soude et celui de l'eau pure à la même température. Pourquoi sont-ils différents?
- La relation : $[\text{H}_3\text{O}^+].[\text{OH}^-] = 10^{-14} \text{ (mol.l}^{-1}\text{)}^2$ est satisfaite pour l'eau pure à 25 °C. Cette relation est-elle encore vérifiée lors de la mise en solution diluée de solutés comme la soude (ou l'acide chlorhydrique)? Comment se comportent les concentrations des ions H_3O^+ et OH^- dans ce cas?

34.1 Une solution de soude contient 20 g par litre de pastilles de soude. Quelle est sa concentration?

34.2 Quelle masse de soude solide faut-il dissoudre dans un litre de solution pour obtenir une solution de concentration égale à $0,4 \text{ mol.l}^{-1}$?

34.3 Donner les concentrations des ions H_3O^+ et des ions OH^- dans des solutions de soude dont les pH sont respectivement $\text{pH} = 12$ et $\text{pH} = 10$.

34.4 Donner les concentrations en ions H_3O^+ et OH^- dans des solutions d'acide chlorhydrique dont les pH sont respectivement $\text{pH} = 3$ et $\text{pH} = 5$.

34.5 Donner les concentrations en mol.l^{-1} des solutions d'hydroxyde de sodium suivantes dont on a relevé le pH :

solution A : $\text{pH} = 10,0$; solution B : $\text{pH} = 11,5$; solution C : $\text{pH} \approx 13$.

Quelle est la solution la plus basique?

34.6 Une solution de soude contient 0,008 g de soude dans un volume de 200 cm^3 . Quel est le pH de cette solution?

34.7 Quelle masse de soude cristallisée faut-il dissoudre de façon à obtenir 125 cm^3 de solution de $\text{pH} = 11,2$?

34.8 On dispose de quatre solutions de soude A, B, C, D, de concentrations connues :

$$C_A = 10^{-2} \text{ mol.l}^{-1}; \quad C_C = 4 \text{ g.l}^{-1};$$

$$C_B = 3 \cdot 10^{-3} \text{ mol.l}^{-1}; \quad C_D = 0,2 \text{ g.l}^{-1}.$$

Quel est leur pH?

34.9 On dispose d'une « lessive de soude » à 8 mol.l^{-1} .

1/ Quelle masse d'hydroxyde de sodium contiennent 250 cm^3 de cette lessive?

2/ On veut préparer 5 l d'une solution à $0,005 \text{ mol.l}^{-1}$. Comment faut-il procéder?

3/ Dans quel intervalle de pH se trouve le pH de la solution obtenue?

34.10 Le pH d'une solution de soude de concentration $C = 10^{-7} \text{ mol.l}^{-1}$ est 7,2. Calculer les concentrations $[\text{Na}^+]$ et $[\text{OH}^-]_1$ provenant de la soude disloquée et $[\text{H}_3\text{O}^+]$ et $[\text{OH}^-]_2$ provenant de la dissociation de l'eau. Comparer les concentrations $[\text{OH}^-]_1$ et $[\text{OH}^-]_2$. (Calculatrice nécessaire.)

34.11 Dans 50 cm^3 d'une solution de sulfate de cuivre II de concentration $C_1 = 10^{-2} \text{ mol.l}^{-1}$, on verse 20 cm^3 d'une solution de soude de concentration

$$C_2 = 10^{-2} \text{ mol.l}^{-1}.$$

1/ Écrire l'équation-bilan de la réaction observée.

2/ Quelle masse de précipité obtient-on? Quelles sont les concentrations des espèces qui sont restées en solution?

3/ Quel volume de la solution de soude faut-il ajouter pour que les ions cuivre II précipitent complètement? On supposera l'hydroxyde de cuivre II totalement insoluble. Quelles seront alors les concentrations des espèces en solution?

34.12 On électrolyse une solution aqueuse de soude.

1/ A 40 °C sous 1 atm, on recueille un volume de dihydrogène égal à 500 l. Quelle est la quantité de dihydrogène formé? (volume molaire à 40 °C : 25,7 l).

2/ Quelle masse de l'autre gaz recueille-t-on à l'anode?

3/ Quelle est la masse d'eau électrolysée?

34.13 Dans un électrolyseur, on introduit 600 cm^3 d'une solution de soude à $0,5 \text{ mol.l}^{-1}$. On effectue l'électrolyse avec un courant d'intensité constante et égale à 5 A.

1/ Quel est le temps nécessaire pour que la concentration de la soude soit multipliée par 1,5?

2/ Quel volume de dioxygène, mesuré dans les conditions normales de température et de pression, a-t-on alors obtenu?

34.14 1/ Rappeler une méthode de préparation du dihydrogène au laboratoire.

2/ Généralement, le gaz obtenu est humide. Afin de le dessécher, on fait passer le dihydrogène à travers une colonne remplie de pastilles de soude. A 25 °C sous 1 atm, le débit de gaz humide est de $0,5 \text{ l.min}^{-1}$ et $V_m = 24 \text{ l.mol}^{-1}$. Au bout de 18 minutes, la masse de la colonne desséchante a augmenté de 1,2 g. Calculer :
— le volume total du gaz entré dans le dessiccateur;
— le volume de dihydrogène sortant du dessiccateur en admettant que le gaz soit parfaitement sec;
— la composition en moles du gaz entrant dans le dessiccateur.

34.15 On dépose dans un cristalliseur contenant 1500 cm^3 d'eau un morceau de sodium de masse 1,4 g.

1/ Écrire l'équation-bilan de la réaction observée.

2/ Quelle est la masse de soude formée?

3/ Entre quelles valeurs entières le pH est-il situé?

Interaction entre les solutions d'acide chlorhydrique et d'hydroxyde de sodium

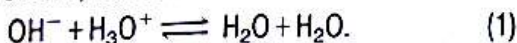
35.1 réaction acide-base

35.1.1 expérience

Dans un volume $V_B = 10 \text{ cm}^3$ d'une solution B de soude diluée, de concentration $C_B = 10^{-2} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$, de $\text{pH} = 12$, l'indicateur bleu de bromothymol (zone de virage 6-8, voir fiche technique p. 333) adopte une teinte bleue. Versons dans cette solution un volume $V_A = 12 \text{ cm}^3$ d'une solution A d'acide chlorhydrique dilué, de concentration $C_A = 10^{-2} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$, de $\text{pH} = 2$. Après avoir agité le mélange, le bleu de bromothymol vire au jaune. Un pHmètre indique un pH voisin de 3. La solution initialement basique est donc devenue acide. Un thermomètre permet de déceler une élévation de température de la solution.

35.1.2 interprétation

La solution B contenait essentiellement des ions OH^- (et Na^+) et la solution A des ions H_3O^+ (et Cl^-). Lorsqu'on a versé A dans B , les ions OH^- se sont trouvés en présence d'un grand nombre d'ions H_3O^+ provenant de A . Les ions H_3O^+ et OH^- ne peuvent coexister en trop grand nombre; ils s'éliminent mutuellement selon :



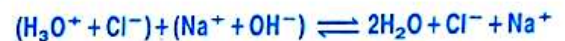
Cette réaction est l'inverse de l'autoprotolyse de l'eau. Elle s'achève lorsque le produit $[\text{H}_3\text{O}^+][\text{OH}^-]$ atteint la valeur permise, soit $K_e = 10^{-14} (\text{mol} \cdot \ell^{-1})^2$ (à $25 \text{ }^\circ\text{C}$). Dans cette réaction d'élimination mutuelle, les ions H_3O^+ , plus nombreux au départ que les ions OH^- , restent également plus nombreux une fois la réaction achevée. Le mélange est acide comme le confirme la valeur du $\text{pH} = 3$. Dans le mélange :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-3} \text{ mol} \cdot \ell^{-1} \text{ et } [\text{OH}^-] = 10^{-11} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$$

La quantité d'ions OH^- « rescapés » est extrêmement faible. S'achevant par la disparition « quasi totale » de l'espèce initialement minoritaire, la réaction (1) est dite *quasi totale*.

Les ions Cl^- et Na^+ , accompagnateurs respectivement des ions H_3O^+ et OH^- , jouent le rôle de spectateurs.

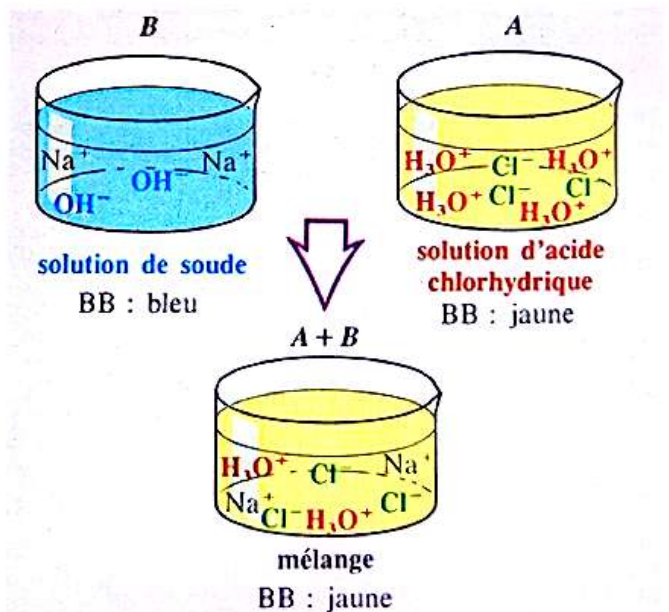
- Lorsqu'on mélange une solution d'hydroxyde de sodium (Na^+ et OH^-) et une solution d'acide chlorhydrique (H_3O^+ et Cl^-), il se produit une réaction acide-base quasi totale entre les ions H_3O^+ et OH^- , selon :



ou plus simplement :



Cette réaction libère de la chaleur : elle est exothermique.



1. Schématisation de la réaction acide-base lors du mélange de deux solutions de soude et d'acide chlorhydrique. Les quantités d'ions représentés ne correspondent évidemment pas à la réalité; en les multipliant par 10^{22} , elles deviennent réalistes! Après la réaction $\text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^- \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$, les ions H_3O^+ , ici en excès, confèrent au mélange son acidité.

Application 1 :

Reprendre les données de l'expérience du paragraphe 35.1.1.

1/ Quelles sont les quantités d'ions OH^- et H_3O^+ mis initialement en présence ?

2/ Quelles sont les quantités d'ions OH^- et H_3O^+ dans le mélange lorsque la réaction acide-base est achevée ? Cette réaction est-elle quasi totale ?

1/ Calculons les quantités initiales :

• Dans $V_B = 10 \text{ cm}^3$ de solution B :

$$n_{\text{OH}^-} = C_B \cdot V_B = 10^{-2} \times 10 \cdot 10^{-3} = 10^{-4} \text{ mol.}$$

Dans cette solution les ions H_3O^+ sont en quantité négligeable.

• Dans $V_A = 12,2 \text{ cm}^3$ de solution A :

$$n_{\text{H}_3\text{O}^+} = C_A \cdot V_A = 10^{-2} \cdot 12,2 \cdot 10^{-3} = 12,2 \cdot 10^{-5} \text{ mol.}$$

Dans cette solution les ions OH^- sont en quantité négligeable.

Ainsi 10^{-4} mol d'ions OH^- et $1,22 \cdot 10^{-4}$ mol d'ions H_3O^+ sont mis en présence pour réagir.

2/ Calculons les quantités contenues dans le mélange après la réaction.

Si $\text{pH} \approx 3$, alors $[\text{H}_3\text{O}^+] \approx 10^{-3} \text{ mol.}\ell^{-1}$.

Les ions H_3O^+ sont maintenant dispersés dans le volume $V_A + V_B \approx 22 \text{ cm}^3$ et :

$$n'_{\text{H}_3\text{O}^+} = [\text{H}_3\text{O}^+] \cdot (V_A + V_B) \approx 10^{-3} \times 22 \cdot 10^{-3} = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ mol.}$$

Nous retrouvons là la différence des quantités d'ions OH^- et H_3O^+ initialement mis en présence :

$$n'_{\text{H}_3\text{O}^+} = n_{\text{H}_3\text{O}^+} - n_{\text{OH}^-}.$$

Quant à la quantité d'ions OH^- « rescapés », nous trouvons :

$$[\text{OH}^-] = \frac{10^{-14}}{[\text{H}_3\text{O}^+]} \approx 10^{-11} \text{ mol.}\ell^{-1},$$

$$\text{et } n'_{\text{OH}^-} = [\text{OH}^-] \cdot (V_A + V_B) \approx 10^{-11} \times 22 \cdot 10^{-3} = 2,2 \cdot 10^{-13} \text{ mol.}$$

De 10^{-4} mole d'ions OH^- au départ, il n'en reste que $2,2 \cdot 10^{-13}$. La réaction est donc quasi totale.

35.2 équivalence dans une réaction acide-base

35.2.1 expérience

Dans un volume $V_A = 10 \text{ cm}^3$ d'une solution A d'acide chlorhydrique de concentration $C_A = 10^{-2} \text{ mol.}\ell^{-1}$ et contenant quelques gouttes de bleu de bromothymol (couleur jaune), versons très exactement un volume $V_B = 10 \text{ cm}^3$ d'une solution B de soude de concentration $C_B = 10^{-2} \text{ mol.}\ell^{-1}$.

Agitons. Le bleu de bromothymol adopte une couleur verte. Un pH-mètre indique $\text{pH} = 7$.

La solution initialement acide est devenue neutre.

Provoquons, en chauffant doucement, l'évaporation de l'eau. Nous obtenons un solide blanc cristallisé.

Observons au microscope ce solide cristallisé puis des cristaux de chlorure de sodium. Nous constatons une identité entre les deux structures cristallines; le solide blanc cristallisé est du chlorure de sodium.

35.2.2 interprétation

Le volume V_A de solution A contient :

$$n_A = C_A \cdot V_A = 10^{-2} \times 10 \cdot 10^{-3} = 10^{-4} \text{ mol d'ions } \text{H}_3\text{O}^+.$$

Le volume V_B de solution B contient :

$$n_B = C_B \cdot V_B = 10^{-2} \times 10 \cdot 10^{-3} = 10^{-4} \text{ mol d'ions } \text{OH}^-.$$

Lors du mélange, les ions H_3O^+ et OH^- sont en surnombre mais en quantités égales.

Après s'être éliminés mutuellement, les quantités restantes sont égales et obéissent à la loi de coexistence :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] \cdot [\text{OH}^-] = 10^{-14} \text{ (mol.}\ell^{-1})^2 \text{ (à } 25^\circ\text{C).}$$

En conséquence $[\text{H}_3\text{O}^+] = [\text{OH}^-] = 10^{-7} \text{ mol.}\ell^{-1}$.

La solution est neutre. Contenant des ions Na^+ et Cl^- en quantités égales, c'est de l'eau salée. L'évaporation de l'eau permet d'obtenir le chlorure de sodium cristallisé.

Lors d'une réaction entre une solution d'acide chlorhydrique et une solution de soude, on dit qu'il y a **équivalence** si n_A , quantité d'ions hydronium H_3O^+ apportés par la solution acide est égale à n_B , quantité d'ions hydroxyde OH^- apportés par la solution basique.

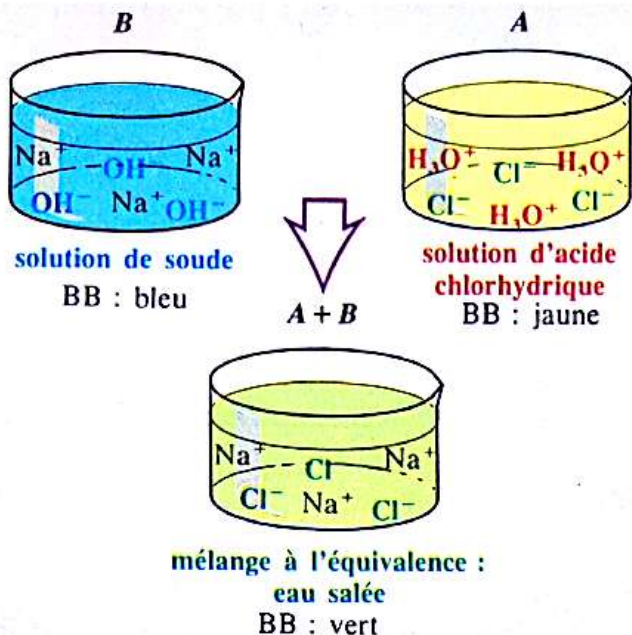
• A l'équivalence :

$$n_A = n_B \\ C_A \cdot V_A = C_B \cdot V_B$$

avec C_A : concentration de la solution acide,
 C_B : concentration de la solution basique,
 V_A : volume de la solution acide,
 V_B : volume de la solution basique.

A l'équivalence d'une réaction acide chlorhydrique-soude, on obtient une solution neutre de chlorure de sodium.

Une solution de soude permet donc de *neutraliser* une solution d'acide chlorhydrique et vice-versa.



2. Schématisation de la réaction acide-base à l'équivalence. (Les quantités d'ions représentés ne correspondent pas à la réalité.) A l'équivalence, le mélange ne contient ni ions H_3O^+ , ni ions OH^- en excès : $[\text{H}_3\text{O}^+] = [\text{OH}^-] = 10^{-7} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$. Le mélange est neutre.

35.3 dosages

35.3.1 principe d'un dosage

Un *dosage* consiste à déterminer expérimentalement la concentration d'une solution dont on connaît les constituants.

Pour doser une solution d'acide chlorhydrique, on peut utiliser une solution de soude de concentration C_B connue.

Pour doser une solution de soude, on peut utiliser une solution d'acide chlorhydrique de concentration C_A connue.

A l'aide d'une *pipette jaugée* (voir fiche technique) on prélève un volume V_A , par exemple, de la solution acide à doser, de concentration C_A *inconnue*. Cette solution est mise dans un bécher qui contient alors $C_A \cdot V_A$ moles d'ions H_3O^+ , quantité inconnue.

On ajoute à cette solution quelques gouttes d'un indicateur coloré, choisi tel que sa zone de virage inclut ou voisine le pH 7, le bleu de bromothymol par exemple. A l'aide d'une *burette graduée* (voir fiche technique) on verse progressivement la solution de soude de concentration C_B *connue*. Pour un volume V_B que l'on mesure, le bleu de bromothymol change de teinte : c'est l'*équivalence*.

La quantité $C_B \cdot V_B$ d'ions OH^- versés est connue.

A l'équivalence : $C_A \cdot V_A = C_B \cdot V_B$,

d'où : $C_A = C_B \cdot \frac{V_B}{V_A}$.

Application 2 :

En reprenant les données de l'expérience citée plus haut (paragraphe 35.2.1), calculer :

1/ la concentration en chlorure de sodium du mélange final. Évaluer cette concentration en $\text{mol} \cdot \ell^{-1}$ et en $\text{g} \cdot \ell^{-1}$;

2/ la masse de chlorure de sodium obtenue après évaporation.

1/ Dans la solution A de volume V_A , nous avons :

$$n_A = C_A \cdot V_A = 10^{-4} \text{ mol d'ions } \text{Cl}^-.$$

Dans la solution B de volume V_B , nous avons :

$$n_B = C_B \cdot V_B = 10^{-4} \text{ mol d'ions } \text{Na}^+.$$

Dans le mélange de volume $V = V_A + V_B$, les concentrations sont :

$$[\text{Cl}^-] = \frac{n_A}{V_A + V_B} = \frac{10^{-4}}{20 \cdot 10^{-3}} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \ell^{-1},$$

$$[\text{Na}^+] = \frac{n_B}{V_A + V_B} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}.$$

Une telle solution aurait pu être réalisée par dissolution, dans 1 ℓ d'eau, de $5 \cdot 10^{-3}$ mole de chlorure de sodium cristallisé NaCl. La concentration en chlorure de sodium est égale à $5 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$.

La masse molaire de NaCl est :

$$23 + 35,5 = 58,5 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}.$$

La masse de $5 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$ est donc :

$$m = 58,5 \times 5 \cdot 10^{-3} = 0,293 \text{ g}.$$

La concentration massique est égale à $0,293 \text{ g} \cdot \ell^{-1}$.

2/ Le volume du mélange est :

$$V = V_A + V_B = 20 \text{ cm}^3.$$

La masse de chlorure de sodium contenu dans ce volume est :

$$m = C \cdot V = 0,293 \times 20 \cdot 10^{-3} \approx 6 \text{ mg}.$$

35.3.2 choix des indicateurs colorés

Sur le graphique de la fiche expérimentale, nous avons indiqué les zones de virage des indicateurs usuels (voir chapitre 34). Nous constatons que le pH varie brutalement de 3 à 10 à l'équivalence, ce qui correspond aux zones de virage des indicateurs proposés. Ces indicateurs virent donc pratiquement tous en même temps pour $V_B = V_{\text{éq}}$. Ils permettent ainsi de repérer l'équivalence.

Toutefois il est préférable que le point d'équivalence E appartienne à la zone de virage de l'indicateur coloré.

C'est pour cette raison qu'il est conseillé, lorsqu'on dose une solution d'acide chlorhydrique par la soude, d'utiliser le bleu de bromothymol.

Fiche expérimentale

variation du pH lors d'un dosage

Lors d'un dosage de 10 cm^3 d'une solution d'acide chlorhydrique, repérons le pH de la solution acide contenue dans le bécher au fur et à mesure que l'on verse à l'aide d'une burette graduée une solution de soude à $0,1 \text{ mol.l}^{-1}$.
Pour mesurer le pH, nous plongeons les électrodes

d'un pHmètre dans la solution et relevons le pH pour différents volumes V_B de soude versée. Il est possible, à défaut de pHmètre, de relever le pH à l'aide d'un papier pH indicateur universel. On a obtenu les résultats ci-dessous et tracé le graphique de la relation $V_B \mapsto \text{pH}$.

dosage de 10 cm^3 d'une solution d'acide chlorhydrique par une solution de soude à $0,1 \text{ mol.l}^{-1}$

V_B (cm^3)	0	3	4	6	8	9	9,9	10	10,1	10,2	11	15	17
pH	1	1,3	1,4	1,6	2	2,3	3,3	7	10,7	11	11,7	12,3	12,4

Initialement la solution est nettement acide et le pH varie peu.

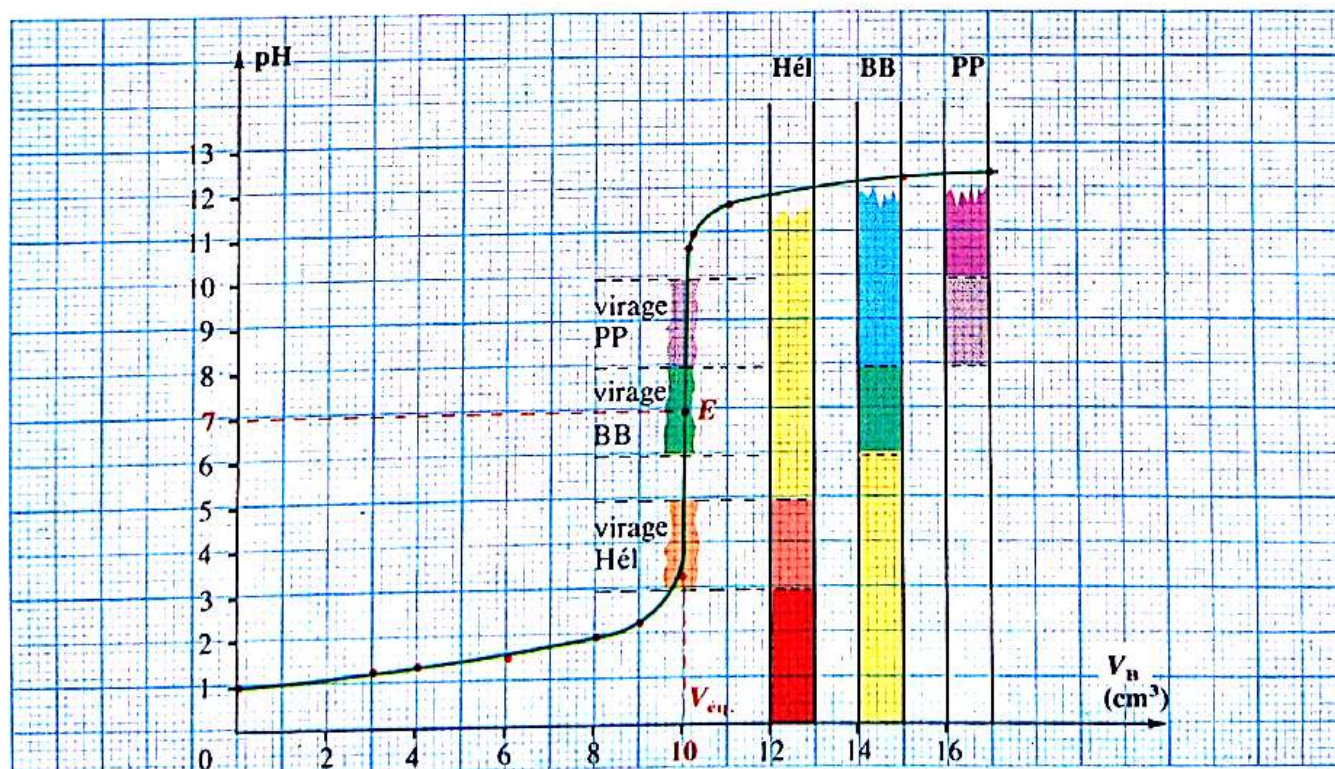
Le pH varie ensuite brutalement; quelques gouttes de soude permettent de le faire passer de 5 à 9. Pour passer de $\text{pH}=6$ à $\text{pH}=8$, c'est-à-dire faire virer le bleu de bromothymol, *une goutte suffit*. On peut relever sur le graphique le point *E*

d'équivalence :

pour $\text{pH}=7$, $V_B = V_{\text{eq.}} = 10 \text{ cm}^3$.

La connaissance de $V_{\text{eq.}}$ permet de calculer C_A connaissant C_B et V_A .

Après l'équivalence, le pH de la solution, nettement basique, varie peu quand on ajoute de la soude.

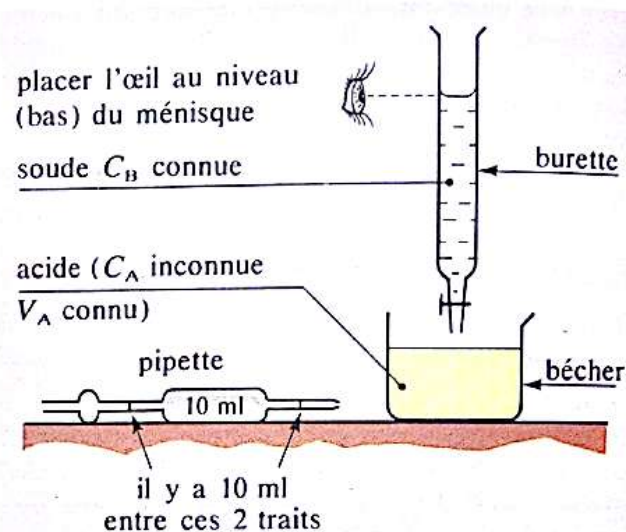


Fiche technique

technique d'un dosage

1. Verrerie utilisée

- **Burette** : Ses graduations sont équidistantes de $0,1 \text{ cm}^3$. On y placera la solution de soude de concentration C_B connue, après l'avoir rincée avec cette solution.
- **Pipette** : Elle sert à prélever un volume V_A de solution acide. Le volume indiqué sur celle-ci (par exemple 10 ml) correspond au volume compris entre les deux traits. Elle doit être rincée au préalable avec la solution acide utilisée.
- **Bécher** : Il va recueillir le volume V_A d'acide prélevé avec la pipette. Il doit être rincé à l'eau distillée.

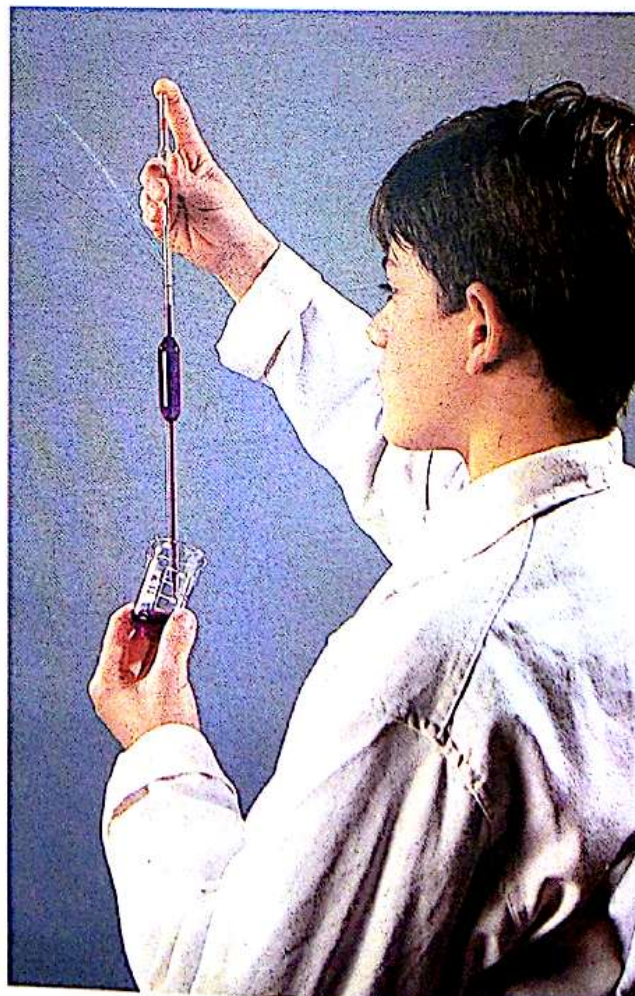


2. Technique du dosage

- Rincer la burette avec la solution de soude. Ajuster le niveau de la soude au zéro.
- Rincer la pipette à l'acide et le bécher à l'eau distillée. Verser avec la pipette un volume V_A d'acide à doser (généralement 10 ml ou 20 ml). Y ajouter 2 ou 3 gouttes de bleu de bromothymol.
- Si l'on utilise aussi un pHmètre, on ajoutera de l'eau distillée afin que les électrodes puissent tremper suffisamment. (On notera que cet ajout ne modifie pas la quantité d'ions H_3O^+ déjà introduits.)
- Faire un premier dosage rapide, cm^3 par cm^3 , afin de repérer la zone de virage. Agiter en permanence.
- Faire un second dosage avec un nouveau prélèvement d'acide. Verser alors la soude goutte à goutte dans la zone de virage repérée.
- Noter le volume V_B de solution de soude versée correspondant à la goutte qui provoque le virage de l'indicateur.

La concentration de l'acide est donnée par :

$$C_A = C_B \cdot \frac{V_B}{V_A}$$

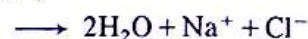
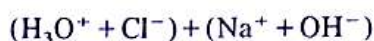


- La pipette se bouche avec l'index. ▶
- Le niveau du ménisque est repéré à la hauteur des yeux.
- L'écoulement du liquide doit se faire contre la paroi du bécher.

Application 3 :

On dispose d'une solution B de soude de concentration inconnue et d'une solution A d'acide chlorhydrique de concentration $C_A = 10^{-1} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$. On prélève 20 cm^3 de la solution B et on y ajoute quelques gouttes de bleu de bromothymol. On verse lentement la solution A dans la solution B. Le bleu de bromothymol vire au vert lorsque un volume $V_A = 18 \text{ cm}^3$ de solution A a été versé. Calculer la concentration de la solution B.

Le bleu de bromothymol devient vert quand l'équivalence de la réaction acide-base :



est obtenue.

La quantité n_A d'ions H_3O^+ versés est alors égale à la quantité n_B d'ions OH^- contenus dans le volume V_B :

$$n_A = n_B, \\ C_A \cdot V_A = C_B \cdot V_B.$$

Nous pouvons calculer C_B :

$$C_B = \frac{C_A \cdot V_A}{V_B} = 10^{-1} \times \frac{18}{20} = 0,09 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}.$$

Application 4 :

On dispose d'une solution B titrée de soude, de concentration $0,090 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$. Une solution d'acide chlorhydrique A est réalisée en diluant 100 fois (10 cm^3 dans 1ℓ) une solution commerciale. Pour une prise d'essai de $10,0 \text{ cm}^3$ de solution A, l'équivalence s'obtient avec une coulée de burette $V_B = 12,8 \text{ cm}^3$ de solution B.

1/ Quelle est la concentration de la solution commerciale?

2/ A partir de la solution A, comment réaliser 500 cm^3 d'une solution acide de concentration exacte $C'_A = 0,100 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$?

1/ La concentration de la solution « fille » A s'obtient en écrivant qu'à l'équivalence la quantité n_B d'ions OH^- versés est égale à la quantité n_A d'ions H_3O^+ de la prise d'essai :

$$n_A = n_B, \text{ soit } C_A \cdot V_A = C_B \cdot V_B,$$

$$\text{d'où } C_A = \frac{C_B \cdot V_B}{V_A} = 0,090 \times \frac{12,8}{10,0} = 0,115 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}.$$

La solution « mère », commerciale, est 100 fois plus concentrée, soit :

$$C = 11,5 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}.$$

2/ Calculons la quantité n'_A d'ions H_3O^+ contenus dans le volume $V'_A = 500 \text{ cm}^3$ d'une solution de concentration $C'_A = 0,100 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$:

$$n'_A = C'_A \cdot V'_A = 5,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol}.$$

Cette quantité d'ions peut être prélevée dans un volume V de la solution A de concentration $C_A = 0,115 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$. Calculons V :

$$n'_A = C'_A \cdot V'_A = C_A \cdot V \\ V = \frac{C'_A \cdot V'_A}{C_A} = \frac{5,0 \cdot 10^{-2}}{0,115} = 0,435 \ell.$$

En mélangeant 435 cm^3 de solution A à $0,115 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$ et 65 cm^3 d'eau distillée, on obtient 500 cm^3 de solution acide à $0,100 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$.

Faire le point

- Quelle est l'équation-bilan de la réaction de l'acide chlorhydrique sur la soude? Quel est l'effet thermique de cette réaction?
 - Quel est l'aspect général de la courbe $\text{pH} = f(V_B)$ obtenue lorsqu'on verse une solution de soude dans une solution d'acide chlorhydrique? Faire un schéma.
 - La réaction de l'acide chlorhydrique sur la soude, donc des ions H_3O^+ sur les ions OH^- , est-elle partielle? quasi totale?
- La réaction d'autoprotolyse de l'eau est-elle partielle? quasi totale? Que pensez-vous de ces deux réactions? Qu'est-ce qu'un équilibre chimique?
- Quel est l'aspect général de la courbe $\text{pH} = f(V_A)$ obtenue lorsqu'on verse une solution d'acide chlorhydrique dans une solution de soude?
 - Définir l'équivalence d'un mélange d'acide chlorhydrique et de soude.
 - Quelle est la composition d'un mélange d'acide chlorhydrique et de soude à l'équivalence? Quel est son pH?
 - Qu'est-ce qu'un dosage?
 - Comment repérer l'équivalence si on ne dispose pas d'un pHmètre. Quelle particularité de la courbe $\text{pH} = f(V)$ utilise-t-on?
 - Quel est le meilleur indicateur de fin de réaction pour le dosage de la soude par l'acide chlorhydrique? Quel changement de coloration observe-t-on dans le bécher si celui-ci contient l'indicateur et une solution de soude et que la burette contient la solution d'acide?

35.1 On prend des solutions d'acide chlorhydrique et de soude de même concentration égale à $1 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$ et on réalise les expériences suivantes :

1/ On mélange 20 cm^3 de la solution d'acide chlorhydrique à 20 cm^3 de la solution de soude dans un bécher. La température s'élève de 7°C environ.

2/ On mélange 20 cm^3 de la solution d'acide chlorhydrique à 20 cm^3 d'eau distillée dans un bécher. La température ne change pratiquement pas.

3/ On mélange 20 cm^3 de la solution de soude à 20 cm^3 d'eau distillée dans un bécher. Là, encore, la température ne change pratiquement pas. Comment expliquer l'élévation importante de température dans l'expérience 1/ par rapport aux expériences 2/ et 3/?

35.2 Une solution d'acide chlorhydrique contenant $n_A = 2 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$ d'ions H_3O^+ est mélangée à une solution de soude contenant $n_B = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$ d'ions OH^- .

1/ Écrire l'équation-bilan de la réaction.

2/ Sachant que le volume du mélange est $V = 20 \text{ cm}^3$, calculer la concentration des espèces en solution après la réaction.

35.3 On mélange 50 cm^3 d'une solution de soude à $0,5 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$ et 50 cm^3 d'une solution d'acide chlorhydrique à $1 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$. Le mélange obtenu est-il acide ou basique? Calculer sa composition. Quel volume de l'une des deux solutions faut-il ajouter au mélange pour obtenir une solution de $\text{pH} = 7,0$?

35.4 On mélange un volume $V_A = 10 \text{ cm}^3$ d'une solution d'acide chlorhydrique de concentration $C_A = 10^{-1} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$ à un volume $V_B = 5 \text{ cm}^3$ d'une solution de soude de concentration $C_B = 10^{-1} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$.

1/ Calculer les quantités d'ions H_3O^+ et OH^- introduits dans le mélange.

2/ Écrire l'équation-bilan de la réaction qui se produit.

3/ Calculer les quantités et les concentrations des espèces contenues dans le mélange après la réaction.

4/ Calculer le pH du mélange.

35.5 Reprendre l'exercice précédent avec :

$$V_A = 10 \text{ cm}^3; C_A = 10^{-1} \text{ mol} \cdot \ell^{-1};$$

$$V_B = 7 \text{ cm}^3; C_B = 2 \cdot 10^{-1} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}.$$

35.6 On dispose de 10 cm^3 d'une solution d'acide chlorhydrique de concentration $C = 10^{-3} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$.

1/ Quelle quantité d'ions OH^- faut-il mélanger à cette solution pour obtenir l'équivalence?

2/ Quelle masse de soude cristallisée doit-on dissoudre dans cette solution pour obtenir l'équivalence?

35.7 On dispose de 20 cm^3 d'une solution de soude de concentration $C = 10^{-1} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$.

1/ Quelle quantité d'ions H_3O^+ faut-il introduire dans cette solution pour aboutir à l'équivalence?

2/ Quel volume de gaz chlorure d'hydrogène doit-on introduire dans cette solution pour obtenir l'équivalence? (Volume molaire dans les conditions de l'expérience : $24,5 \ell$.)

35.8 Calculer le volume de solution de soude nécessaire pour obtenir l'équivalence avec 10 cm^3 d'une solution d'acide chlorhydrique décimolaire ($10^{-1} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$) pour les trois concentrations suivantes de la solution basique :

$$C_B = 5 \cdot 10^{-1} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}; C_B = 10^{-1} \text{ mol} \cdot \ell^{-1};$$

$$C_B = 2 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}.$$

35.9 Une solution de soude de concentration inconnue est dosée par une solution d'acide chlorhydrique de concentration $0,10 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$. Pour une prise d'essai de $10,0 \text{ cm}^3$ de la solution basique, il faut verser $8,2 \text{ cm}^3$ de la solution d'acide pour obtenir le virage de l'hélianthine. Calculer la concentration de la solution de soude en $\text{mol} \cdot \ell^{-1}$ et en $\text{g} \cdot \ell^{-1}$.

35.10 A l'aide d'une solution de soude de concentration $0,12 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$, on dose une solution d'acide chlorhydrique. Pour une prise d'essai de 20 cm^3 de solution basique, on verse avec la burette $5,2 \text{ cm}^3$ de la solution d'acide chlorhydrique pour obtenir le virage de l'indicateur.

Quelle est la concentration de la solution acide?

35.11 On met dans un bécher 20 cm^3 d'une solution d'acide chlorhydrique dont on ne connaît pas la concentration. Il faut verser 12 cm^3 d'une solution d'hydroxyde de sodium à $0,02 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$ pour atteindre le point d'équivalence.

- 1/ Calculer la concentration de la solution chlorhydrique.
- 2/ Quel volume de chlorure d'hydrogène gazeux a-t-on dissous dans un litre d'eau pure pour obtenir cette solution (dans les conditions de l'expérience, le volume molaire est égal à $24 \text{ l} \cdot \text{mol}^{-1}$)?

35.12 Pour doser une solution commerciale d'acide chlorhydrique de concentration voisine de $10 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$, on en prélève 10 ml que l'on introduit dans une fiole jaugée de 1 l . On complète avec de l'eau distillée pour obtenir 1 l de solution diluée. Celle-ci est dosée avec une solution de soude étalon de concentration $0,10 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$. Pour une prise d'essai de $10,0 \text{ ml}$ de solution acide diluée, l'équivalence s'obtient pour une coulée de $10,8 \text{ ml}$ de solution basique. Calculer la concentration de la solution commerciale en $\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ et en $\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$.

35.13 Pour réaliser une solution de soude étalon, de concentration $0,10 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$, on commence par peser $4,0 \text{ g}$ de soude cristallisée que l'on dissout de façon à obtenir un litre de solution. La solution obtenue est dosée avec une solution d'acide chlorhydrique étalon de concentration $0,10 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$. Pour une prise d'essai de soude de $20,0 \text{ cm}^3$, la coulée de solution acide est de $18,7 \text{ cm}^3$.

- 1/ Quelle est la concentration de la solution de soude?
- 2/ La soude pesée est-elle pure? Quel est le pourcentage d'impuretés?
- 3/ Quel volume de solution de soude faut-il mélanger à de l'eau distillée pour obtenir 500 cm^3 de solution étalon à $0,05 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$?

35.14 Une solution A d'acide chlorhydrique de concentration C_A inconnue est dosée par une solution B de soude de concentration $C_B = 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$. Pour 10 cm^3 de solution acide A, l'équivalence est obtenue avec $5,7 \text{ cm}^3$ de solution B. Dans 5 cm^3 de solution A, on ajoute ensuite une solution de nitrate d'argent en excès. Quelle est la masse du précipité obtenu?

35.15 Une solution de soude commerciale est diluée 100 fois. La solution diluée est dosée par une solution d'acide chlorhydrique de concentration $0,10 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$. Une coulée de burette de $10,6 \text{ cm}^3$ de solution acide permet de neutraliser une prise d'essai de $10,0 \text{ cm}^3$ de soude.

1/ Quelle est la concentration de la solution commerciale?

2/ On verse dans un tube à essai 20 cm^3 de solution de sulfate de cuivre à $0,05 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$. Quel volume de solution de soude commerciale permet de précipiter entièrement les ions cuivre II? Combien de gouttes de solution faut-il verser, si une goutte a un volume d'environ $1/20 \text{ cm}^3$?

35.16 Une solution commerciale d'acide chlorhydrique (solution A) porte une étiquette où figure la densité de cette solution par rapport à l'eau : $d = 1,18$.

- 1/ Quelle est la masse volumique de cette solution?
- 2/ En admettant que le gaz chlorure d'hydrogène se dissolvent dans l'eau sans modifier le volume de la solution, quelle est la concentration molaire volumique de cette solution?
- 3/ Afin de vérifier l'hypothèse faite en 2/, on prélève 20 cm^3 de la solution A et l'on complète avec de l'eau distillée jusqu'à obtention d'un litre de solution (solution A'). On prélève alors 5 cm^3 de A' et l'on effectue le dosage de cet échantillon par une solution titrée de soude, en présence de bleu de bromothymol. Quelle est la coloration de ce dernier dans la solution A'? La solution titrée de soude a une concentration de $0,1 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$; le bleu de bromothymol change de couleur quand on a versé $5,7 \text{ cm}^3$ de soude.
 - a/ Quelle est le changement de coloration observé?
 - b/ Quelle est la concentration de la solution A'?
- 4/ Quelle est la concentration de la solution A? L'hypothèse faite est-elle vérifiée? Quelle est la masse d'eau nécessaire pour préparer 1 litre de la solution A? Quel est son volume?

35.17 On dose $20,0 \text{ cm}^3$ d'une solution d'acide chlorhydrique à $0,100 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$ par une solution d'hydroxyde de sodium également à $0,100 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$.

- 1/ Quel volume $V_{B \text{ eq.}}$ faut-il verser pour obtenir l'équivalence? Quelle est la composition de la solution ainsi obtenue? Quel est son pH?
- 2/ Le volume d'une goutte issue de la burette utilisée est d'environ $0,05 \text{ cm}^3$. Quelle est la composition de la solution obtenue pour $V_{B \text{ eq.}} + 0,05 \text{ cm}^3$? Quel est son pH?
- 3/ Calculer de la même façon la composition et le pH de la solution obtenue pour $V_{B \text{ eq.}} - 0,05 \text{ cm}^3$.
- 4/ En déduire la pente moyenne de la courbe $\text{pH} = f(V_B)$ au voisinage du point d'équivalence E.

Solutions acides

Solutions basiques

36.1 acides et solutions acides

36.1.1 quelques solutions acides

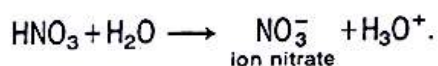
Fournissant des ions hydronium H_3O^+ au contact de l'eau, le gaz chlorure d'hydrogène HCl est un **acide** :



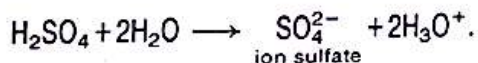
La solution obtenue contenant des ions H_3O^+ en excès (par rapport aux ions OH^-) est une **solution acide**.

Il existe d'autres acides et d'autres solutions acides. Citons quelques acides :

- Acide nitrique HNO_3 :

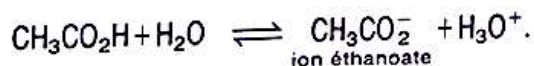


- Acide sulfurique H_2SO_4 :



Fournissant deux ions H_3O^+ à partir d'une molécule H_2SO_4 , l'acide sulfurique est un **diacide**.

- Acide éthanóique (ou acétique) $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$:



On utilise une double flèche car seules quelques-unes des molécules $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$ se transforment; donnant relativement peu d'ions H_3O^+ par rapport au nombre de molécules $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$, cet acide est dit **faible**.

- Dioxyde de carbone (ou gaz carbonique) CO_2 :



- Un acide introduit dans l'eau donne une solution acide par formation d'ions hydronium H_3O^+ .

Il existe un très grand nombre d'acides : acides citrique (dans le jus de citron), formique (dans le venin des fourmis), oxalique (dans l'oseille), etc.

36.1.2 propriétés communes aux solutions acides

Toutes les solutions acides ont un pH inférieur à 7 (à 25 °C).

- Les propriétés communes aux solutions acides sont celles de l'ion H_3O^+ .

Certaines de ces propriétés ont été étudiées à propos de la solution d'acide chlorhydrique (*paragraphe 33.3.2.*)

Remarque : Notons une différence : la solution d'acide nitrique (H_3O^+ et NO_3^-) attaque le métal cuivre alors que les autres solutions acides ne le peuvent pas; comme nous le verrons dans le chapitre suivant, c'est l'ion nitrate NO_3^- qui est responsable de cette particularité.

36.1.3 acides purs ou concentrés

- A la température et sous pression ordinaires, l'acide chlorhydrique pur est un gaz, corrosif et dangereux.
- L'acide nitrique pur est un liquide qui dégage des vapeurs toxiques. Il est très corrosif et dangereux.
- L'acide sulfurique est aussi un liquide incolore, sirupeux, très corrosif. L'aspect parfois brunâtre du liquide est dû à des impuretés. Cet acide attaque avec virulence les matières organiques (*fig. 3*). Il peut brûler très gravement la peau : c'est le « vitriol », de triste réputation.



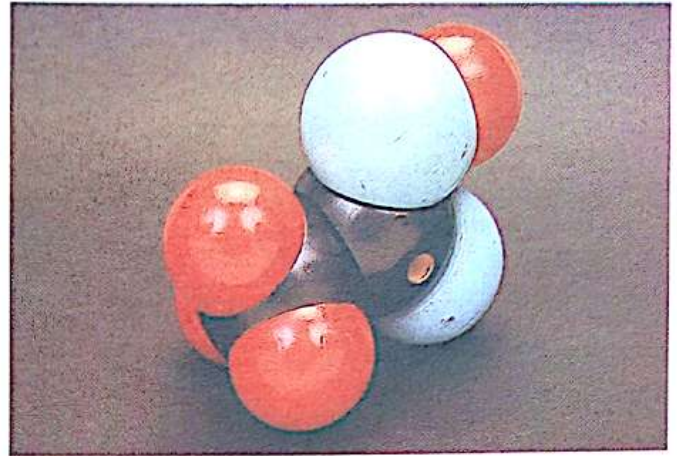
1. L'acide nitrique pur dégage des vapeurs toxiques.

• L'acide éthanóïque (ou acétique) pur est un liquide incolore d'odeur très caractéristique de vinaigre (c'est en effet l'un des constituants du vinaigre). Pur, il est très dangereux à manipuler.

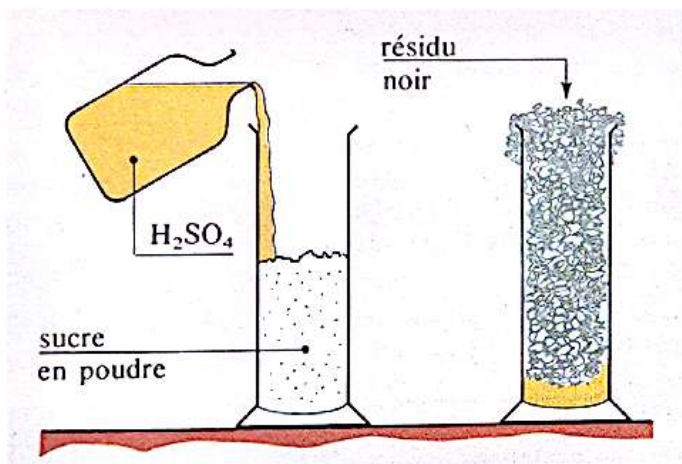
• Tous les acides purs ou concentrés sont très dangereux.

Pour réaliser une solution acide diluée, il faut mélanger un peu d'acide pur ou concentré dans beaucoup d'eau : ce mélange se fait généralement avec un très fort dégagement de chaleur qui peut entraîner l'ébullition du liquide et sa projection vers le visage du manipulateur imprudent.

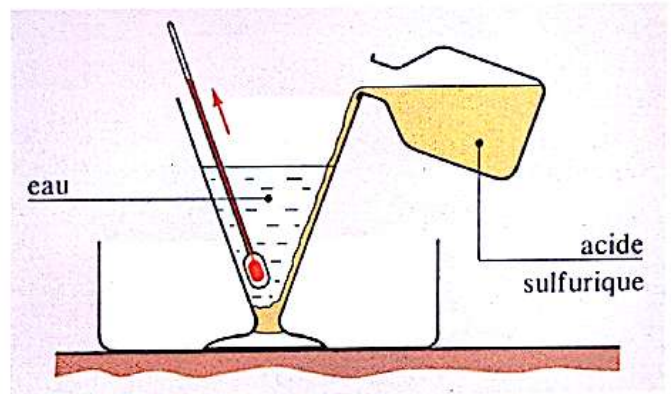
Par précaution, il faut toujours, lentement, verser l'acide dans l'eau froide et jamais l'inverse.



2. Modèle compact de l'acide éthanóïque ($\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$).



3. Par action de l'acide sulfurique concentré, le sucre est détruit. Il se forme un résidu noir qui contient du carbone.

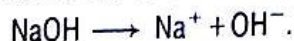


4. Pour diluer l'acide sulfurique concentré, il faut verser l'acide dans l'eau avec précaution. La dilution s'accompagne d'une grande élévation de température, qui peut même provoquer la rupture du verre qui contient la solution.

36.2 bases et solutions basiques

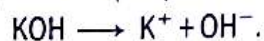
36.2.1 quelques solutions basiques

Mise en solution dans l'eau, la soude cristallisée NaOH se disloque et fournit des ions OH^- en excès selon :

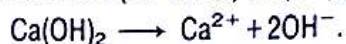


La solution obtenue est basique. Il existe d'autres bases capables de fournir des ions OH^- . Citons-en quelques-unes :

• Hydroxyde de potassium (ou potasse cristallisée) KOH :



• Hydroxyde de calcium (ou chaux) $\text{Ca}(\text{OH})_2$:



Fournissant deux ions OH^- à partir d'une molécule $\text{Ca}(\text{OH})_2$, la chaux est une *dibase*.

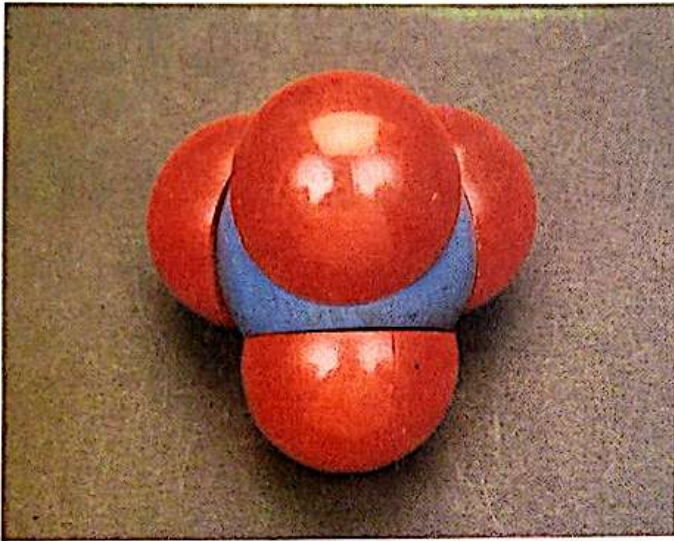


5. A gauche, cristaux d'hydroxyde de potassium (potasse). A droite, cristaux d'hydroxyde de sodium (soude).

- **Ammoniac** NH_3 . C'est un gaz qui en solution dans l'eau réagit selon l'équation-bilan :

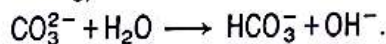


Mais, seul un nombre assez faible de molécules NH_3 se transforment en ion ammonium NH_4^+ avec formation d'un ion hydroxyde OH^- : l'ammoniac est une base dite *faible*.



6. Modèle compact de l'ion ammonium (NH_4^+).

- **Ion carbonate** CO_3^{2-} . Cet ion apparaît par exemple lors de la dissolution du carbonate de sodium Na_2CO_3 (ou du calcaire CaCO_3) :



Ainsi les eaux ruisselant sur les sols calcaires sont-elles légèrement basiques.

L'ion hydrogénocarbonate (ou bicarbonate) HCO_3^- manifeste également des propriétés basiques faibles ($\text{pH} \approx 8,5$), qui peuvent être utilisées pour réduire l'acidité stomacale.

- **Une base introduite dans l'eau donne une solution basique par formation d'ions hydroxyde OH^- .**

36.2.2 propriétés communes aux solutions basiques

Toutes les solutions basiques ont un pH supérieur à 7 (à 25 °C).

- **Les propriétés communes aux solutions basiques sont celles de l'ion OH^- .**

Certaines de ces propriétés ont été étudiées à propos de la solution de soude (*paragraphe 34.3.2*).

Remarque : Avec une solution d'ammoniac, certains précipités d'hydroxyde peuvent se redissoudre comme nous le verrons au chapitre suivant.

36.2.3 bases pures ou concentrées

A l'état pur, soude et potasse sont des solides blancs, cristallisés. Ce sont des produits caustiques, très avides d'eau. Laissés à l'air libre, les cristaux absorbent l'humidité de l'air et deviennent déliquescents; ils peuvent

donc jouer un rôle de desséchant. Avides d'eau, soude et potasse peuvent détruire les matières organiques et par conséquent la peau en provoquant des brûlures. Le carbonate de sodium est également dangereux.

Ainsi ces produits peuvent être utilisés, avec grande précaution, pour détruire les matières qui obstruent les canalisations des lavabos.

L'ammoniac, à température et sous pression ordinaires, est un gaz d'odeur piquante, irritant, dangereux pour les voies respiratoires et pour les yeux. Ce gaz est très soluble dans l'eau. On en trouve dans le commerce des solutions concentrées.

- **Les bases pures ou concentrées sont des produits dangereux.**

Pour réaliser des solutions diluées, on ajoute progressivement la base dans l'eau froide.

36.3 pH de quelques solutions courantes

Le tableau ci-dessous présente le pH moyen de quelques liquides de la vie courante.

solutions	pH
jus de citron	2,2
Coca-cola	2,6
vinaigre	3,0
jus de raisin	4,0
eau Perrier	5,0
eau de pluie	6,2
eau Volvic	7,0
eau de mer	8,5
eau de Javel	11,0

Dans le jus de citron, l'acide citrique est responsable de l'acidité. C'est essentiellement le dioxyde de carbone CO_2 dissous qui confère aux boissons gazeuses leur grande acidité. C'est l'acide acétique qui acidifie le vinaigre.

Les ions carbonate sont responsables du caractère basique des eaux calcaires et peuvent contribuer à celui de l'eau de mer. L'eau de pluie, chargée de CO_2 , est en revanche légèrement acide.

36.4 importance du pH

36.4.1 pH et biologie

Les réactions chimiques assurant le fonctionnement de la machinerie vivante sont extrêmement sensibles à l'environnement, en particulier au pH; les divers organes du corps ne peuvent fonctionner que dans des intervalles étroits de pH :

— Les diastases de l'estomac ne peuvent assurer leurs fonctions digestives qu'en milieu très acide : le suc gastrique, secrété par la paroi stomacale, est un fluide dont le pH est à peine supérieur à 1!

— Le sang, dont les rôles sont multiples, a un pH qui ne peut varier qu'entre 7,3 et 7,5. Si le pH du sang est extérieur à cet intervalle, l'organisme est en danger de mort! Heureusement le sang contient aussi des substances dont le rôle est de freiner les éventuelles variations de pH : on dit que le sang constitue un milieu « tamponné ».

— La peau et les tissus conjonctifs sont sensibles au pH. Les eaux de piscines ont un pH régulièrement contrôlé, compris entre 7,2 et 7,6 : si le pH varie, on ajoute soit un acide faible, soit une base faible, pour le rétablir à une valeur convenable. Certains savons donnent une solution savonneuse acide, mais la plupart donnent une solution basique qui ne convient pas à toutes les peaux.



Certains shampoings ont un pH indiqué par le fabricant.

36.4.2 pH et agriculture

Les agriculteurs savent depuis longtemps que, dans un sol donné, certaines plantes se développent bien tandis que d'autres périssent. La connaissance du « pH du sol » est un des éléments qui permet de sélectionner des plantes adaptées à chaque sol.

Qu'est-ce que le « pH d'un sol »? Pour le déterminer, on effectue un prélèvement de terre que l'on introduit dans un volume déterminé d'eau; après agitation et filtration, on mesure le pH de la solution ainsi obtenue. On constate ainsi que les terrains calcaires ont un pH basique alors que les sols siliceux ont un pH acide.

Blé, pommes de terre, fraisiers, vignes préfèrent les sols acides ($5 < \text{pH} < 6,5$). Les plantes dites de bruyère ne tolèrent pas un sol basique. Les betteraves, par exemple, préfèrent un sol basique ($\text{pH} > 7$).



Les rhododendrons ne tolèrent que les sols acides.



Un sol trop basique provoque la chlorose du pommier.



Les betteraves préfèrent un sol basique.

DOCUMENT

Les pluies acides : un holocauste écologique?

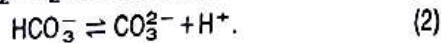
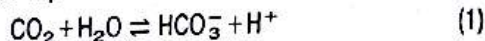
«Holocauste écologique»! C'est dans ces termes que les Canadiens qualifient les conséquences des pluies acides exportées vers leur pays par les Américains. Atteinte au patrimoine forestier, fermeture des pêcheries, altération des édifices et des monuments, impact sur la santé des habitants et des troupeaux... le tableau est cataclysmique. Celui que les pays scandinaves ont brossé de leur situation d'importateurs des nuisances étrangères l'est à peine moins.

La balance des échanges atmosphériques de composés soufrés, dont on sait l'importance pour l'acidification des pluies, fait apparaître de lourds écarts. L'Autriche, la Finlande, la Norvège, la Suède et la Suisse présentent un budget annuel déficitaire : elles reçoivent au total plus de soufre qu'elles n'en produisent. A l'opposé, l'Allemagne, la Belgique, le Danemark, la France, la Grande-Bretagne et les Pays-Bas exportent une part non négligeable de leurs nuisances.

Du jus de citron sur les têtes américaines

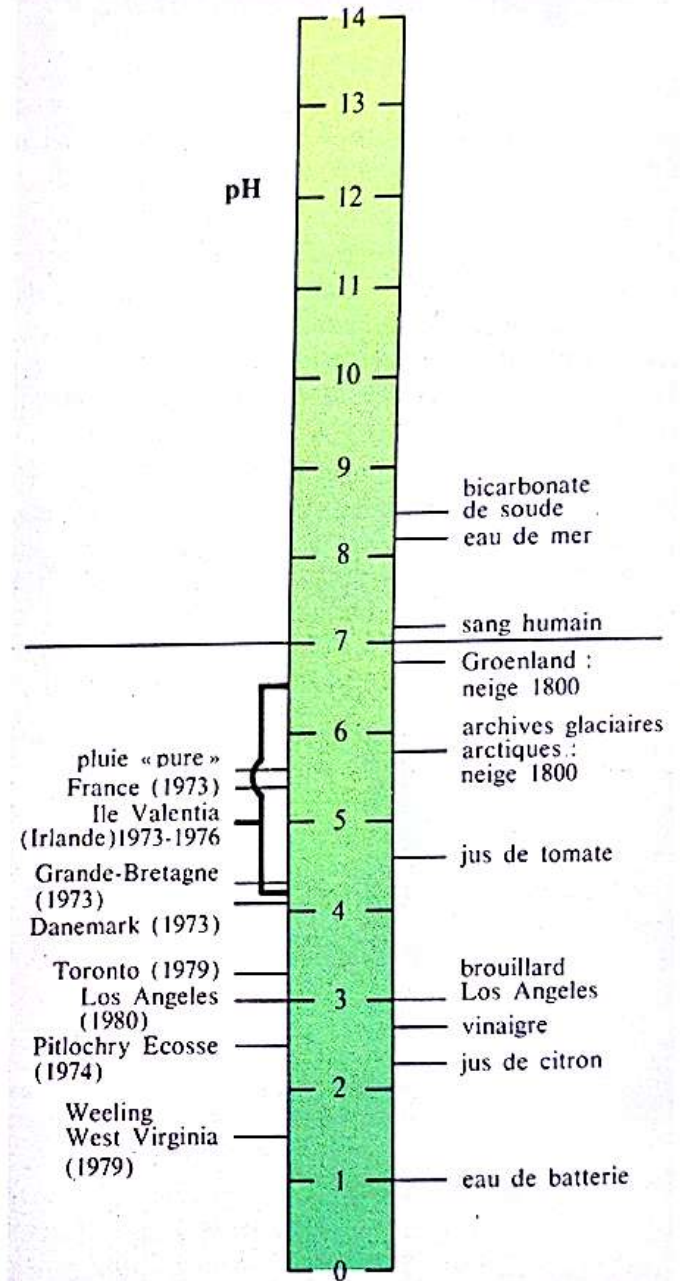
Cependant la dimension émotionnelle associée à l'acidité des pluies — alors que l'augmentation des teneurs en dioxyde de carbone dans la haute atmosphère est, à terme, plus préoccupante — tient sans doute aussi à la facilité extrême de la mise en évidence du symptôme — l'acidité — et aux conséquences immédiates qu'on peut en déduire pour l'équilibre des écosystèmes naturels. L'acidité d'une solution aqueuse se quantifie aisément à partir de son pH qui mesure la concentration en ions H^+ de la solution. Il suffit simplement pour cela de disposer d'une électrode verre-calomel couplée à un millivoltmètre. Peu de méthodes de mesure des pollutions sont à la fois aussi fiables et universellement répandues.

En fait, une pluie «pure» n'est jamais neutre : c'est une solution aqueuse en équilibre avec les gaz atmosphériques, tout particulièrement le dioxyde de carbone qui, par dissolution, fournit deux réactions chimiques équilibrées :



Dans les conditions usuelles, la réaction (1) qui conduit à la formation d'hydrogencarbonate prédomine et fixe le pH de la pluie à 5,6 (voir figure).

On admet généralement que l'acidification est due à l'oxydation de l'anhydride sulfureux (SO_2) et des oxydes d'azote respectivement en acide sulfurique (H_2SO_4) et en acide nitrique (HNO_3). La contribution relative de chacun de ces acides aux teneurs en ions H^+ de l'eau de pluie (70 % H_2SO_4 , 30 % HNO_3) n'est pas une constante; il semble notamment que l'importance des composés azotés augmente avec le temps.



Sur cette échelle des pH, sont présentées les acidités des pluies mesurées en différents endroits du monde et à différentes époques.

L'impact de la pollution ne souffre pas de discussion : entre les neiges de la période qui a précédé la révolution industrielle, collectées dans les archives glaciaires et dont le pH ne descend pas au-dessous de 5,6, et la pluie de Weeling dont l'acidité se situait à mi-chemin de celle du jus de citron et de l'eau acide d'une batterie, la marge est large. Large mais très fluctuante.

DOCUMENT

Entre 1972 et 1976, les observations réalisées à Glacier Park au Montana ont permis de montrer que, pour un pH moyen de 5,7, les valeurs extrêmes enregistrées se situaient entre 2,6 et 7,10! On est d'ailleurs en droit de se demander si — plus qu'une évolution régulière de l'acidité des pluies — le phénomène perturbant n'est pas justement sa fluctuation dans le temps, notamment au regard des capacités d'adaptation de la faune et de la flore aux conditions nouvelles. Les conséquences de l'acidification des eaux de surface par les retombées humides sont en effet appréciées de façon très variable. Dans le massif de l'Adirondak (Etat de New York), en 1930, seuls 8 lacs sur 214 avaient un pH inférieur à 5. En 1974, 109 étaient dans cette situation et 32 d'entre eux pouvaient être considérés comme morts. Les conséquences directes d'une telle acidification, constatées également par les Scandinaves, entraînent en priorité la disparition des espèces aquatiques les plus nobles et les plus fragiles, telles que les salmonidés. Les effets chimiques induits par un abaissement du pH ne sont pas moins importants : ils contribuent à la mise en solution de sels métalliques toxiques. Une expérience de longue durée, mise en œuvre par une équipe canadienne sur le lac « 223 » au nord-ouest de l'Ontario, apporte des informations intéressantes. Après avoir étudié pendant deux ans les caractéristiques de ce lac, les scientifiques entreprirent en 1976 d'y ajouter progressivement et régulièrement de l'acide sulfurique. Durant la première année, du fait du pouvoir tampon de l'eau du lac, le pH n'évolua pas. A partir de 1977, les additions acides se traduisirent par une baisse régulière de 0,25 unités pH par an, pour atteindre aujourd'hui un pH de 5,05. Bien entendu, cette évolution s'accompagna d'une modification des caractéristiques chimiques et biologiques du lac.

Les teneurs en métaux toxiques tels que zinc, fer, manganèse et aluminium provenant des sédiments lacustres augmentèrent dans des proportions notables.



Pins dans les Vosges dévastés par les « pluies acides ».

Par contre l'activité chlorophyllienne s'est sensiblement accrue. Mieux : au pH actuel, le zooplancton est sans doute en légère augmentation et, même si elles ont changé, le nombre total d'espèces d'algues n'a pas varié. Ces résultats sont en opposition totale avec les constatations des scientifiques scandinaves. Comme on peut difficilement mettre en cause la qualité des équipes scientifiques concernées, force est d'envisager qu'un processus d'acidification continue, mené artificiellement, ménage à la faune et à la flore des possibilités d'évolution que ne permettent généralement pas les fluctuations des conditions naturelles.

Une image souvent simpliste

En fait, acidité n'est pas en soi synonyme de mort : lors d'expériences *in vitro*, des biologistes de l'EPA ont pu montrer qu'avec une eau d'irrigation à pH=3 (proche du vinaigre), le rendement des cultures en épinards ne diminuait que de 15 %, la production de soja s'améliorait nettement et l'assimilation chlorophyllienne était renforcée au niveau des aiguilles de pins. Force est de constater aujourd'hui que la mesure du pH des eaux de pluies contemporaines, leur comparaison avec le pH des neiges des années 1880, le rôle fondamental attribué à SO₂ et NO, certains dommages constatés, ont contribué pendant une dizaine d'années à donner de ce problème une image simpliste sur laquelle il convient de s'interroger.

Il importe de mesurer clairement l'ampleur de notre ignorance face à un phénomène apparemment aussi élémentaire, pour estimer honnêtement ce qui sépare notre ambition de protéger l'environnement de notre capacité à appréhender les facteurs qui en conditionnent la qualité.

Extraits d'un article de Renaud Vie le Sage.
La Recherche, n° 131.

Quelques questions

- Comment expliquer que certains pays soient exportateurs, d'autres importateurs des nuisances?
- Pourquoi l'augmentation de la teneur en dioxyde de carbone de la haute atmosphère est-elle préoccupante?
- ...« concentration en ions H⁺ »... On a adopté ici une écriture simplifiée. Préciser.
- « Une électrode verre-calomel »... Commenter.
- D'après cet article, quel serait le danger principal pour la flore et la faune aquatique?

Faire le point

- Donner le nom et la formule de trois acides.
- Donner le nom et la formule de trois bases.
- Définir les termes « solution acide », « solution basique ».
- Quelle teinte prend le bleu de bromothymol en solution acide? en solution basique?
- Citer un exemple d'acide faible. Que signifie ce terme?
- Qu'est-ce qu'une dibase? Citer un exemple.
- Que signifie la double flèche \rightleftharpoons qui figure dans le bilan de la réaction entre l'ammoniac et l'eau?
- Par analogie avec la réaction du dioxyde de carbone sur l'eau, établir l'équation-bilan de la réaction du dioxyde de soufre sur l'eau. La solution obtenue est-elle acide ou basique?
- L'affirmation suivante est-elle exacte : « Tous les acides attaquent le fer et le zinc en donnant un dégagement de dihydrogène »?
- Pourquoi les boissons gazeuses sont-elles acides?

36.1 Le pH d'une solution aqueuse saturée de dioxyde de carbone CO_2 est voisin de 5. Écrire la réaction du dioxyde de carbone sur l'eau en admettant qu'il se forme, en plus des ions H_3O^+ , des ions HCO_3^- (ions hydrogénocarbonate).

36.2 L'élément potassium a pour numéro atomique $Z = 19$.

1/ Dans quelle colonne de la classification périodique se trouve-t-il? Comment nomme-t-on les éléments de cette colonne?

2/ Quelle est la structure électronique d'un atome de potassium dans son état fondamental? Quel type d'ion le potassium forme-t-il? Quelles sont les formules du chlorure de potassium et de l'hydroxyde de potassium (encore appelé « potasse »)?

3/ Le pH d'une solution d'hydroxyde de potassium à $0,001 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$ est de 11. Calculer sa composition. Peut-on considérer que la potasse est totalement dissociée en ions?

4/ Quelle est l'équation-bilan de la réaction de la solution d'acide chlorhydrique sur la potasse? Quel est l'effet thermique de cette réaction?

36.3 1/ Quelle est l'équation-bilan de la réaction d'une solution d'acide nitrique sur une solution de potasse? Quel est l'effet thermique de cette réaction?

2/ On mélange 25 cm^3 d'une solution d'acide nitrique à $0,1 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$ et 50 cm^3 d'une solution de potasse à $0,08 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$. Calculer la concentration des divers ions présents dans le mélange après réaction. Quel est son pH? Quelle serait la couleur prise par la phénolphthaléine?

36.4 On prend 10 g d'une solution commerciale d'acide nitrique. On l'étend avec de l'eau pour obtenir 100 cm^3 de solution dont on prélève 10 cm^3 . Cette dernière solution est dosée avec une solution de soude à $1 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$ en présence du bleu de bromothymol. Le virage se produit après addition de $11,1 \text{ cm}^3$ de soude.

1/ Écrire l'équation-bilan de la réaction acido-basique.

2/ Quelle est la masse d'acide pur contenue dans 100 g de la solution commerciale?

36.5 Lors d'un dosage de l'acide éthanóique par la soude, le pH au point d'équivalence est égal à 9. Quel est, des trois indicateurs courants, celui qu'il faut utiliser pour doser l'acide éthanóique par une solution titrée de soude?

36.6 1/ Quelle est la formule de la potasse? Ses solutions conduisent-elles l'électricité?

2/ Calculer la composition d'une solution aqueuse de potasse obtenue en dissolvant 3 g de potasse dans 10ℓ d'eau pure. Quel est le pH de la solution obtenue?

3/ Reprendre les calculs si on utilise 10 m^3 d'eau pure.

36.7 Une solution S_1 a été obtenue en dissolvant 0,126 g d'acide nitrique dans de l'eau de sorte que le volume de solution obtenu est de 2 litres.

1/ Quelle est la concentration de la solution S_1 ? L'ionisation de l'acide étant totale, quel est le pH de cette solution?

2/ On veut déterminer la concentration d'une solution de soude S_2 . L'équivalence est atteinte lorsqu'on a versé 8 cm^3 de S_2 dans 12 cm^3 de S_1 . Quelle est la concentration de S_2 ? Quel est le pH de S_2 (on donne $1,5 \cdot 10^{-3} = 10^{-2,82}$)?

36.8 On se propose de mélanger une solution d'acide sulfurique de concentration $C_A = 10^{-1} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$ et une solution de soude de concentration $C_B = 10^{-1} \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$. Pour un volume $V_A = 10 \text{ cm}^3$ de solution acide :

1/ Quel volume de solution de soude faut-il mélanger pour obtenir l'équivalence?

2/ Quelle est la composition du mélange pour un volume de soude de 30 cm^3 ?

36.9 1/ On dispose d'une solution de soude dont le pH, à $25 \text{ }^\circ\text{C}$, est de 11. Calculer les concentrations des différents ions de la solution.

2/ On laisse l'eau s'évaporer lentement au soleil. Quelle masse de soude recueille-t-on à partir de $0,5 \ell$ de solution?

36.10 1/ A 99 cm^3 d'eau pure, on ajoute 1 cm^3 d'une solution d'acide chlorhydrique à $0,1 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$, puis quelques gouttes d'hélianthine. Quelle est la couleur présentée par cet indicateur coloré?

2/ A 999 cm^3 d'eau pure, on ajoute la même quantité d'acide que précédemment, puis quelques gouttes d'hélianthine. Quelle coloration présente cette fois l'hélianthine?

36.11 Dans 1 litre d'eau pure à $25 \text{ }^\circ\text{C}$, on peut dissoudre au maximum $2,7 \cdot 10^{-2} \text{ mol}$ d'hydroxyde de calcium.

1/ On mélange 2 g d'hydroxyde de calcium à de l'eau pure, de sorte que le volume final soit de 250 cm^3 à $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Que se passe-t-il? Quel est l'aspect du mélange obtenu?

2/ Après filtration du mélange précédent, on recueille une solution limpide : l'eau de chaux. Calculer les concentrations des différents ions présents et le pH.

3/ L'eau de chaux sert habituellement à caractériser le dioxyde de carbone. Écrire l'équation-bilan de la réaction qui fournit du carbonate de calcium CaCO_3 et de l'eau. Dans quel sens varie le pH de l'eau de chaux au cours de cette réaction?

36.12 A 25°C , la zone de virage du bleu de bromothymol est comprise entre les valeurs 6,0 et 7,6. Calculer les concentrations limites en ions H_3O^+ pour que l'indicateur soit bleu puis jaune. L'usage de cet indicateur coloré permet-il de déterminer si une solution aqueuse est acide ou basique?

36.13 On dose $20,0\text{ cm}^3$ d'une solution d'hydroxyde de potassium de concentration C_B inconnue, par une solution d'acide chlorhydrique de concentration $C_A = 0,114\text{ mol}\cdot\ell^{-1}$. L'indicateur coloré utilisé est le bleu de bromothymol.

1/ Quel est l'aspect de la solution initiale?

2/ Décrire les caractéristiques de la courbe représentant les variations du pH de la solution contenue dans le bécher en fonction de V_A , volume de solution chlorhydrique ajouté.

3/ L'indicateur change de teinte pour $V_A = 28,2\text{ cm}^3$. Calculer C_B .

4/ On arrête d'ajouter la solution chlorhydrique dès que l'indicateur a viré. On évapore alors l'eau de la solution. Quelle est la nature du solide que l'on recueille? Quelle est sa masse?

36.14 Soit un indicateur coloré dont la zone de virage est $[\text{pH}_A, \text{pH}_B]$. Pour des pH inférieurs à pH_A , on dit que l'indicateur coloré présente sa teinte acide. Pour des pH supérieurs à pH_B , il présente sa teinte basique.

1/ Si l'hélianthine présente sa teinte acide, peut-on conclure que la solution est acide? Si elle présente sa teinte basique, peut-on en conclure que la solution est basique?

2/ Dans deux échantillons d'une même solution, on ajoute de l'hélianthine dans l'un et de la phénolphthaléine dans l'autre : l'hélianthine est jaune, la phthaléine reste incolore. Peut-on affirmer que la solution est acide? basique?

3/ Dans un troisième échantillon de la solution considérée, on introduit quelques gouttes de bleu de bromothymol; la solution devient jaune. Dans quel intervalle se situe le pH de la solution? Peut-on conclure quant au caractère acide ou basique de cette dernière?

36.15 Le bleu de thymol est un indicateur coloré pouvant présenter trois teintes différentes; à 25°C :

- si le pH de la solution est inférieur à 1,1, il est rouge;
- si ce pH est compris entre 2,5 et 8, il est jaune;
- si ce pH est supérieur à 9,6, il est bleu.

1/ Préciser quelles sont les zones de virage de cet indicateur. Quelles sont les « teintes sensibles » correspondantes?

2/ Quelle serait la teinte prise dans les solutions suivantes :

- acide chlorhydrique à $2\text{ mol}\cdot\ell^{-1}$;
- acide nitrique à $0,001\text{ mol}\cdot\ell^{-1}$;
- eau Perrier;
- potasse à $0,01\text{ mol}\cdot\ell^{-1}$?

Tests d'identification de quelques ions

Au point de vue industriel comme au point de vue biologique, les solutions aqueuses sont très importantes. La détermination de leur composition est donc une opération très courante. Celle-ci est d'abord qualitative : il s'agit de déterminer la nature des différentes espèces dissoutes. Elle est ensuite quantitative : il faut évaluer les concentrations des différents corps présents.

Dans ce chapitre, nous ne nous intéresserons qu'à la première phase : nous allons étudier les tests d'identification de quelques ions.

Nous nous limiterons aux ions suivants :

— *anions* : Cl^- ; SO_4^{2-} ; NO_3^- ; S^{2-} ; CO_3^{2-} ;

— *cations* : Na^+ ; Ag^+ ; Ba^{2+} ; Pb^{2+} ; Al^{3+} ; Zn^{2+} ; Fe^{2+} ; Fe^{3+} ; Cu^{2+} .

Passons d'abord en revue les différents types de renseignements que l'on peut tirer de l'expérimentation.

37.1 couleur des ions

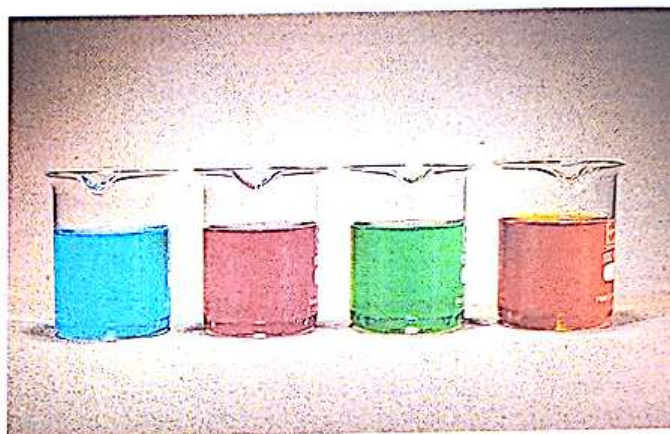
Nous avons noté dans le chapitre 32 que certains ions hydratés absorbent de la lumière visible. Les solutions qui les contiennent possèdent alors une coloration caractéristique.

Dans la liste précédente, seuls les ions Fe^{2+} , Fe^{3+} et Cu^{2+} colorent les solutions qui les contiennent. Tous les autres ions de la liste ne confèrent aucune coloration aux solutions.

37.2 test « à la flamme »

Lorsqu'on fournit de l'énergie à un atome ou à un ion, il passe dans un état qualifié d'« excité ». Il revient à un état d'énergie inférieure en se débarrassant de l'excès d'énergie qu'il possède.

Cette énergie excédentaire peut être évacuée, dans certains cas, sous forme d'énergie lumineuse. L'atome ou l'ion émet alors une lumière qui peut servir à le caractériser : c'est ainsi qu'on décèle la présence des différents éléments dans les étoiles.



1. Certains ions colorent les solutions qui les contiennent. De gauche à droite : ions Cu^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} et Fe^{3+} .



2. Certains ions « excités » émettent une lumière caractéristique. Cette propriété est utilisée dans les feux d'artifice.

Pour obtenir cette émission avec des ions contenus dans une solution, on y trempe un fil de platine recourbé pour former une boucle. On prélève ainsi une goutte de solution que l'on porte dans la flamme d'un bec Bunsen : les ions absorbent de l'énergie thermique, et certains émettent de la lumière visible.

37.3 réaction de précipitation

37.3.1 solubilité des corps

Rappelons que la solubilité d'un corps est la concentration, en ce corps d'une solution saturée. La solubilité dépend de la température et de la nature du corps considéré. Elle est très variable :

— Le nitrate de sodium NaNO_3 a une solubilité de $10,35 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}$. Lorsqu'on introduit des cristaux de nitrate de sodium dans l'eau, les cristaux se disloquent, les ions s'hydratent puis se dispersent parmi les molécules d'eau.

— Le sulfate de calcium CaSO_4 a une solubilité de $5 \text{ mmol} \cdot \ell^{-1}$. Lorsqu'on introduit des cristaux de sulfate de calcium dans l'eau, seuls quelques ions acceptent de quitter les cristaux pour s'hydrater et se disperser parmi les molécules d'eau. Les autres restent regroupés au sein du cristal.

Le tableau ci-contre indique quels sont les cristaux ioniques qui sont solubles et insolubles (c'est-à-dire, en fait, très peu solubles).

anions cations	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	S^{2-}	CO_3^{2-}	OH^-
Na^+	+	+	+	+	+	+
Ag^+	-	≈	+	-	-	-
Ba^{2+}	+	-	+	+	-	≈
Pb^{2+}	-	-	+	-	-	- (*)
Al^{3+}	+	+	+	+	+	- (*)
Zn^{2+}	+	+	+	-	-	- (*)
Fe^{2+}	+	+	+	-	-	-
Fe^{3+}	+	+	+	+	+	-
Cu^{2+}	+	+	+	-	-	-

+ correspond à un composé très soluble

≈ correspond à un composé assez peu soluble

- correspond à un composé très peu soluble

(*) Les hydroxydes correspondants sont *amphotères* : ils se redissolvent en milieu très basiques.

Tableau de solubilités des composés ioniques

Application 1 :

On prend deux béchers contenant chacun 20 cm^3 d'eau. On introduit dans l'un une masse m égale à 2 g de nitrate de sodium et dans l'autre la même masse de sulfate de calcium. On agite. Que se passe-t-il ? Quelle est la composition du contenu des deux béchers ?

Les masses molaires respectives de NaNO_3 et CaSO_4 sont

$$M_1 = 85,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ et } M_2 = 136,2 \cdot \text{mol}^{-1}.$$

Supposons que tous les cristaux se dissolvent; les solutions ont alors des concentrations respectives C_1 et C_2 telles que :

$$C_1 = \frac{m}{M_1} \cdot \frac{1}{V}, \quad C_2 = \frac{m}{M_2} \cdot \frac{1}{V},$$

soit :

$$C_1 = 1,18 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}; \quad C_2 = 0,73 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}.$$

Comparons ces valeurs aux solubilités s_1 et s_2 :

• C_1 est inférieure à s_1 , donc l'hypothèse faite est correcte : le bécher contient une solution limpide de nitrate de sodium telle que :

$$[\text{Na}^+] = [\text{NO}_3^-] = 1,18 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}.$$

• C_2 est supérieure à s_2 , donc l'hypothèse faite est incorrecte : le bécher contient une solution saturée de sulfate de calcium et un dépôt non dissous de sulfate de calcium. La concentration de la solution de sulfate de calcium est donc égale à la solubilité s_2 soit :

$$[\text{Ca}^{2+}] = [\text{SO}_4^{2-}] = 0,005 \text{ mol} \cdot \ell^{-1}.$$

La masse de solide non dissous est :

$$m - s_2 \cdot M_2 \cdot V,$$

soit en grammes :

$$(2 - 0,005 \times 136,2 \times 20 \cdot 10^{-3}) = 2 - 0,0136 \text{ g} = 1,986 \text{ g}.$$

Une très faible partie du solide est passée en solution (moins de 1%). A la limite, nous pourrions considérer CaSO_4 comme insoluble.

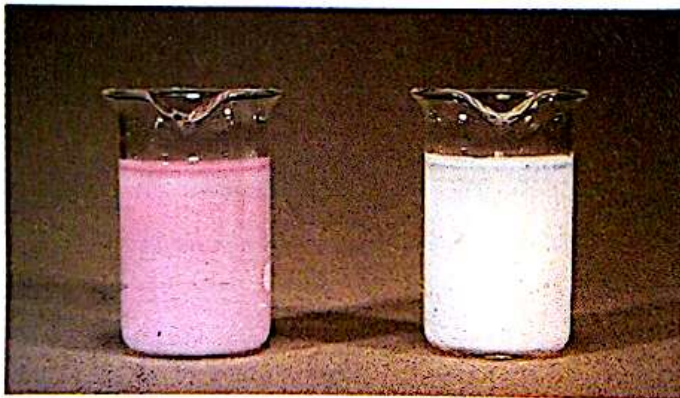
37.3.2 formation de précipités

Mélangeons 5 cm³ d'une solution de sulfate de potassium et 5 cm³ d'une solution de nitrate de baryum. Un précipité blanc, cristallin, apparaît aussitôt et se rassemble au fond du tube. Mélangeons de même 5 cm³ d'une solution de sulfate de cobalt II et 5 cm³ d'une solution de chlorure de baryum. Là encore, un précipité blanc se forme. Il tombe au fond du tube qui contient une solution rose, coloration due aux ions cobalt II hydratés.

Dans la première expérience, le précipité peut, a priori, être du nitrate de potassium ou du sulfate de baryum. Dans la seconde, il peut s'agir de chlorure de cobalt II ou de sulfate de baryum.

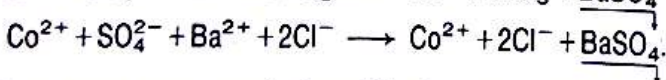
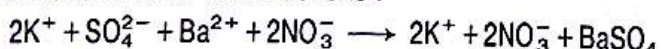
Le précipité, dans chacun des cas, ne peut donc être que du sulfate de baryum BaSO₄. Effectivement le tableau de la page 353 indique que le sulfate de baryum est un corps insoluble.

Les ions baryum Ba²⁺ et sulfate SO₄²⁻ ont une telle affinité l'un pour l'autre que, introduits séparément dans la même solution, ils se retrouvent pour former des grains solides qui troublent la solution et précipitent. Ces ions ne peuvent pas coexister dans une même solution (sauf à l'état de traces) : on dit qu'ils sont *incompatibles*.

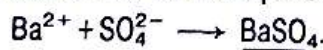


3. Précipitation du sulfate de baryum. La coloration rose, dans le bécher de gauche, est due à la présence d'ions cobalt II hydratés.

Écrivons le bilan des réactions :



Nous remarquons que les ions K⁺, Cl⁻, NO₃⁻ et Co²⁺ ne participent pas à la réaction puisqu'ils demeurent en solution. Ce sont des ions spectateurs. En omettant ces derniers, nous écrivons le bilan simplifié :



Nous pouvons généraliser ces observations :

- Le mélange de deux solutions ioniques limpides conduit à un précipité s'il existe au moins un couple d'ions « incompatibles », c'est-à-dire appartenant à une espèce « insoluble ».

Le tableau précédent peut donc être aussi considéré comme celui de l'incompatibilité des ions.

Application 2 :

On mélange 10 cm³ d'une solution de sulfate de sodium à 0,5 mol.ℓ⁻¹ et V cm³ d'une solution de chlorure de baryum à 0,25 mol.ℓ⁻¹. Déterminer la composition du mélange successivement pour : V = 10, 20, 30 cm³, en considérant que le sulfate de baryum est totalement insoluble.

L'équation-bilan simplifiée de la réaction est :



La quantité d'ions sulfate n₁ que contiendrait le mélange en l'absence de réaction serait :

$$n_1 = 0,5 \times 10 \cdot 10^{-3} = 5 \text{ mmol.}$$

Celle d'ions baryum, n₂, en l'absence de précipitation serait :

$$n_2 = 0,25V \cdot 10^{-3} = 0,25V \text{ mmol.}$$

- Pour V = 10 cm³, n₁ est supérieur à n₂; donc tous les ions baryum introduits sont éliminés de la solution par la réaction de précipitation. La solution contient donc (n₁ - n₂) ions SO₄²⁻, 2n₁ ions sodium et 2n₂ ions Cl⁻. Le précipité est constitué de n₂ mol de sulfate de baryum.

Numériquement les quantités d'ions SO₄²⁻, Na⁺ et Cl⁻ sont donc respectivement de 2,5 mmol, 10 mmol et 5 mmol.

Le précipité contient 2,5 mmol de BaSO₄.

- Pour V = 20 cm³, n₁ est égal à n₂. Les ions baryum et les ions sulfate sont tous éliminés de la solution

$$n_{SO_4^{2-}} = n_{Ba^{2+}} = 0; \quad n_{Na^+} = 10 \text{ mmol} = n_{Cl^-};$$

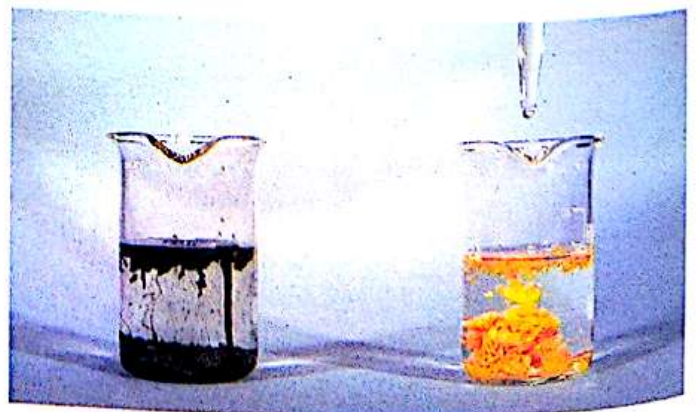
$$n_{BaSO_4} = 5 \text{ mmol.}$$

- Pour V = 30 cm³, n₁ est inférieur à n₂; donc tous les ions sulfate sont éliminés de la solution par la réaction de précipitation. La solution contient donc (n₂ - n₁) ions SO₄²⁻, 2n₁ ions Na⁺ et 2n₂ ions Cl⁻, soit :

$$n_{SO_4^{2-}} = 0; \quad n_{Ba^{2+}} = 2,5 \text{ mmol}; \quad n_{Na^+} = 10 \text{ mmol};$$

$$n_{Cl^-} = 15 \text{ mmol}; \quad n_{BaSO_4} = 5 \text{ mmol.}$$

Remarque : Notons que dans tous les cas, la neutralité électrique de la solution est bien vérifiée.



4. Précipitation de sulfures : de plomb, à gauche, et de cadmium, à droite.

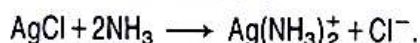
37.4 redissolution du précipité

Mélangeons quelques cm^3 d'une solution de nitrate d'argent et d'une solution de chlorure de sodium par exemple. Un précipité blanc, dont l'aspect rappelle celui du lait caillé, apparaît immédiatement. Les ions Ag^+ et Cl^- , incompatibles, se sont regroupés pour former ce précipité de chlorure d'argent.

Ajoutons alors 1 cm^3 d'une solution concentrée d'ammoniac : cette solution contient principalement des molécules NH_3 dispersées parmi les molécules d'eau. Agitons : le précipité blanc se divise et disparaît ; la solution est redevenue limpide (voir *photo 6*).

Interprétons : Les molécules NH_3 contenues dans la solution ajoutée s'insinuent entre les ions Ag^+ et Cl^- du précipité, entourent les ions argent pour donner des ions $\text{Ag}(\text{NH}_3)_2^+$, qui échappent à l'influence des ions Cl^- ; le précipité se redissout puisque les ions Ag^+ et Cl^- cessent d'être regroupés dans des microcristaux de chlorure d'argent.

Le bilan de cette réaction s'écrit :



L'ion $\text{Ag}(\text{NH}_3)_2^+$ est un ion « complexe » appelé ion diammine-argent I.

Nous rencontrerons, dans ce chapitre, d'autres exemples de redissolution de précipité sous l'action d'un réactif convenablement choisi.

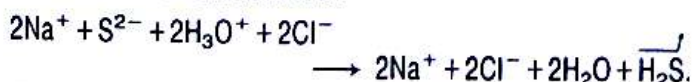
37.5 obtention d'un dégagement gazeux

Au cours de certaines réactions chimiques, des ions peuvent se transformer en molécules neutres qui correspondent à une espèce gazeuse. Lorsque la solution est saturée, des bulles se forment et le gaz s'échappe. Ce départ est facilité si l'on chauffe la solution.

37.5.1 action d'une solution acide

Dans une solution incolore de sulfure de sodium, ajoutons 1 cm^3 d'acide chlorhydrique concentré ; nous percevons l'odeur nauséabonde du sulfure d'hydrogène que l'on peut caractériser par son action sur un papier imbibé d'une solution de nitrate de plomb : le papier noircit au contact du gaz par formation d'une pellicule de sulfure de plomb PbS (voir *photo 9*).

Le bilan de la réaction est :



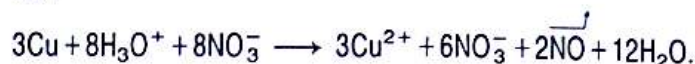
Les ions Na^+ et Cl^- étant spectateurs, on peut écrire :



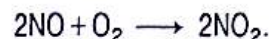
37.5.2 cas particulier de l'ion nitrate

Nous avons vu au chapitre 24 la réaction de l'acide

nitrique sur le métal cuivre. En tenant compte du caractère fort de l'acide nitrique, le bilan de la réaction est :



Le monoxyde d'azote qui se dégage est incolore mais, au contact du dioxygène de l'air, il se transforme au dioxyde d'azote roux :



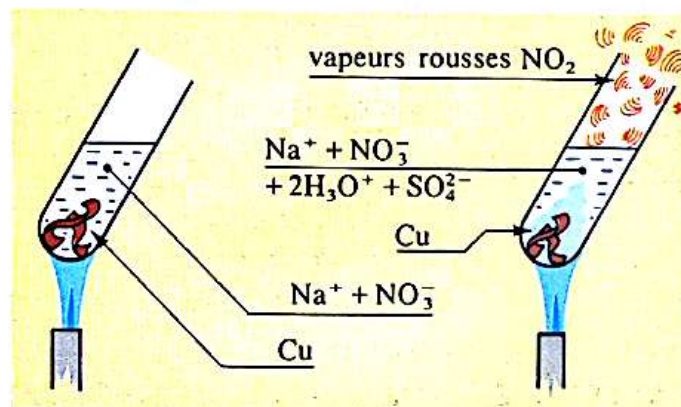
Au cours de ces deux réactions, deux ions nitrate NO_3^- ont donc donné naissance à deux molécules NO_2 .

Réalisons maintenant l'expérience suivante : Dans une solution de nitrate de sodium, introduisons un morceau de tournure de cuivre. Aucune réaction ne se produit. Chauffons doucement pour tenter d'initier la réaction, en vain.

En milieu neutre l'ion nitrate NO_3^- ne peut pas réagir sur le métal cuivre.

Ajoutons 1 cm^3 d'acide sulfurique concentré : une coloration bleutée apparaît au voisinage du copeau de cuivre, dénotant une attaque du métal, puis l'atmosphère du tube se colore en roux (voir *photo 8*) ; les ions nitrate participent donc à la réaction comme lors de l'action de l'acide nitrique. La présence des ions H_3O^+ a rendu possible la réaction de l'ion nitrate sur le métal cuivre.

L'ion nitrate NO_3^- ne peut réagir sur le métal cuivre qu'en milieu acide.



5. L'ion nitrate NO_3^- ne réagit sur le cuivre qu'en milieu acide.

37.6 fiches d'identification

Nous allons maintenant consacrer une fiche d'identification à chacun des ions étudiés. Une fiche comprend, suite au nom et à la formule de l'ion considéré :

- la couleur des solutions ;
- les corps insolubles contenant l'ion ;
- le test principal ;
- un éventuel test complémentaire.

ion chlorure Cl^-

- Les solutions sont incolores.
- Chlorures insolubles : AgCl (blanc); PbCl_2 (blanc).
- *Test principal* : Précipitation du chlorure d'argent AgCl .

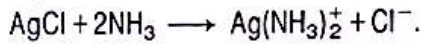
Ajouter à la solution testée quelques gouttes d'une solution de nitrate d'argent (Ag^+ et NO_3^-) : il apparaît un précipité blanc, caillebotté, de chlorure d'argent selon :



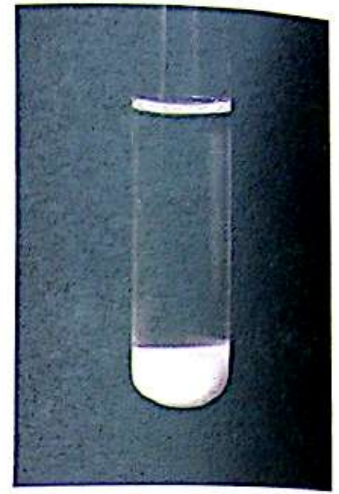
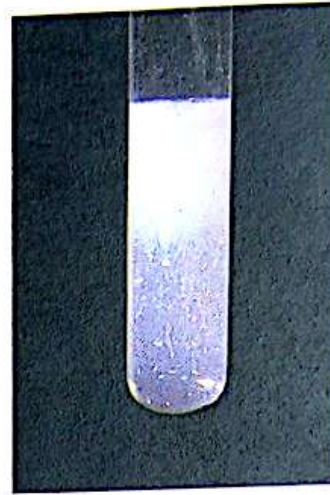
Faire alors trois parts du précipité obtenu puis :

— Exposer la première à la lumière vive; le précipité devient violacé puis noir : de l'argent colloïdal se forme par une réaction photochimique.

— Ajouter dans la deuxième une solution aqueuse d'ammoniac NH_3 : le précipité se redissout par formation d'un ion complexe selon :



— Vérifier que le précipité ne se redissout pas dans l'acide nitrique.

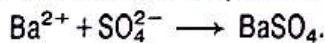


6. Précipitation du chlorure d'argent (à gauche) et redissolution partielle du précipité par addition d'une solution d'ammoniac (à droite). La redissolution est totale si l'ammoniac est en excès.

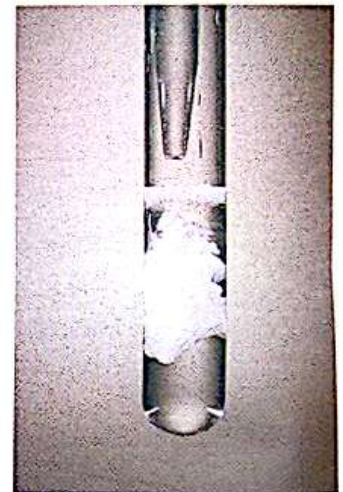
ion sulfate SO_4^{2-}

- Les solutions sont incolores.
- Sulfates insolubles : BaSO_4 (blanc); PbSO_4 (blanc). Ag_2SO_4 , peu soluble, est également blanc.
- *Test principal* : Précipitation du sulfate de baryum BaSO_4 .

Ajouter à la solution testée quelques gouttes d'une solution de nitrate de baryum (Ba^{2+} et 2NO_3^-) ou de chlorure de baryum (Ba^{2+} et 2Cl^-) : il apparaît un précipité blanc de sulfate de baryum selon :



Vérifier que ce précipité est insoluble dans l'acide chlorhydrique ou l'acide nitrique.



7. Précipitation du sulfate de baryum.

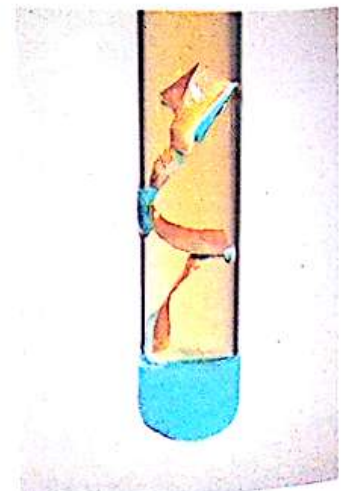
ion nitrate NO_3^-

- Les solutions sont incolores.
 - Nitrates insolubles : aucun.
 - *Test principal* : Dégagement de vapeurs nitreuses NO_2 .
- Ajouter à la solution testée un morceau de tournure de cuivre puis 1 cm^3 d'acide sulfurique concentré : la solution se colore en bleu et des vapeurs rousses de dioxyde d'azote NO_2 emplissent le tube selon :



suivie de : $\text{NO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \longrightarrow \text{NO}_2.$

Précaution : NO_2 est un gaz toxique; éviter de le respirer.



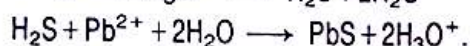
8. Réaction de l'ion nitrate sur le métal cuivre en milieu acide.

ion sulfure S²⁻

- Les solutions sont incolores.
- Sulfures insolubles : tous sauf ceux des métaux de la 1^{re} colonne de la classification périodique (métaux alcalins) et de la 2^e colonne.

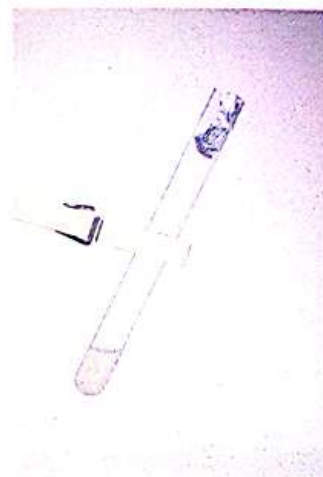
• *Test principal* : Dégagement de sulfure d'hydrogène H₂S.

Ajouter à la solution testée un peu d'acide chlorhydrique et présenter à la sortie du tube à essai un papier imbibé d'une solution de nitrate de plomb (Pb²⁺ et 2NO₃⁻) : le papier noircit par formation de sulfure de plomb PbS, tandis que l'odeur caractéristique du sulfure d'hydrogène devient perceptible :



Précaution : Outre son odeur désagréable, H₂S est un gaz toxique; éviter de le respirer.

9. En milieu acide, l'ion sulfure se transforme en sulfure d'hydrogène. Ce dernier noircit un papier imbibé d'une solution de nitrate de plomb.

**ion carbonate CO₃²⁻**

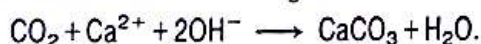
- Les solutions sont incolores.
- Carbonates insolubles : tous sauf ceux des métaux alcalins.

• *Test principal* : Dégagement de dioxyde de carbone CO₂.

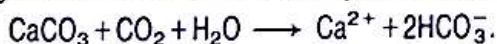
Ajouter à la solution testée un peu d'acide chlorhydrique concentré; adapter un tube à dégagement dont l'extrémité plonge dans de l'eau de chaux. Le dégagement de dioxyde de carbone trouble l'eau de chaux :



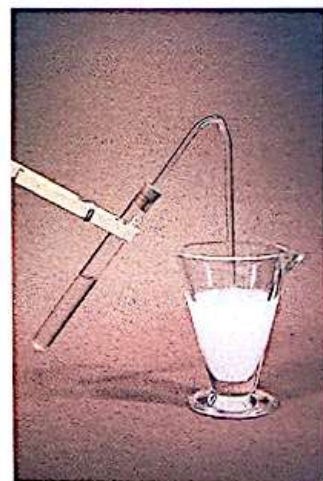
Le trouble de l'eau de chaux correspond à la précipitation du carbonate de calcium CaCO₃ selon :



Remarque : Si le dégagement de CO₂ est trop important, le précipité de CaCO₃ se redissout car il se forme de l'hydrogénocarbonate de calcium qui, lui, est soluble :

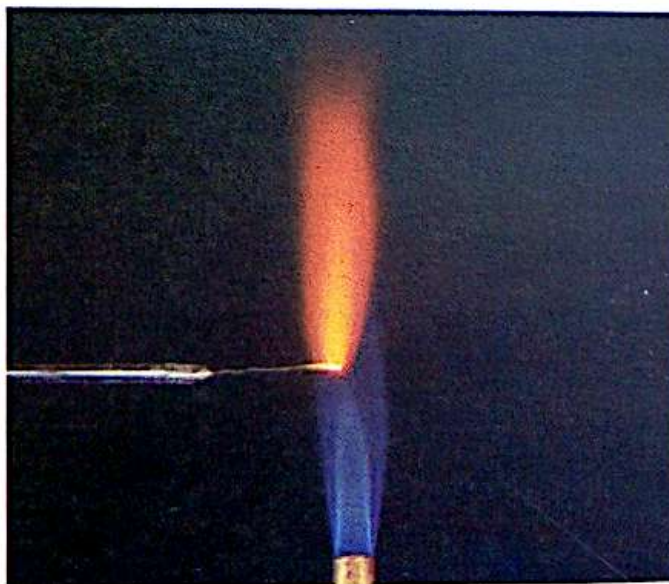


10. En milieu acide, l'ion carbonate se transforme en dioxyde de carbone. Ce dernier trouble l'eau de chaux.

**ion sodium Na⁺**

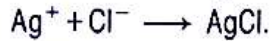
- Les solutions sont incolores.
 - Sels de sodium insolubles : aucun.
 - *Test principal* : Émission d'une lumière jaune dans la flamme.
- Introduire grâce à un fil métallique inattaquable (platine) quelques gouttes de solution dans la flamme d'un bec Bunsen : elle se colore intensément en jaune.

11. Test à la flamme de l'ion sodium. ►



ion argent Ag^+

- Les solutions sont incolores.
 - Sels d'argent insolubles : AgCl (blanc); Ag_2SO_4 (blanc); Ag_2S (noir).
 - L'hydroxyde d'argent AgOH (blanc) se transforme immédiatement en oxyde d'argent Ag_2O (brun).
 - *Test principal* : Précipitation du chlorure d'argent AgCl puis redissolution.
- Ajouter à la solution testée quelques gouttes d'une solution de chlorure de sodium : il apparaît un précipité blanc, cailleboté, de chlorure d'argent selon :



Faire alors deux parts du précipité obtenu puis :

— Exposer la première à la lumière vive; le précipité noircit : de l'argent très divisé se forme grâce à une réaction photochimique.

— Ajouter dans la seconde une solution aqueuse d'ammoniac NH_3 : le précipité se redissout par formation d'un ion complexe selon :

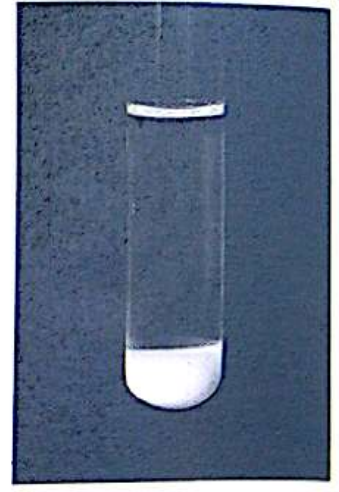
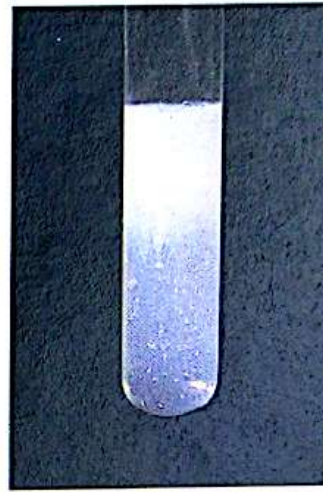
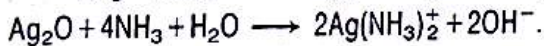
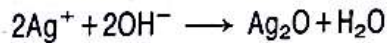


- *Test complémentaire* : Précipitation et redissolution de l'oxyde d'argent Ag_2O .

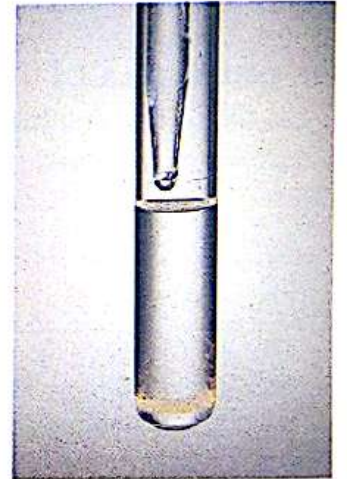
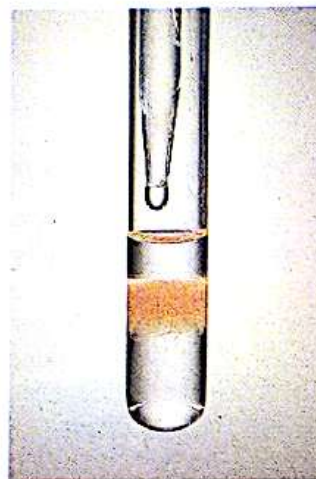
Ajouter à la solution testée quelques gouttes d'une solution d'ammoniac : un précipité brun-noir d'oxyde d'argent Ag_2O apparaît.

Ajouter alors un excès de solution d'ammoniac; la solution redevient limpide grâce à la formation de l'ion complexe $\text{Ag}(\text{NH}_3)_2^+$.

Les équations-bilans sont :



12. Précipitation et redissolution du chlorure d'argent par addition d'une solution d'ammoniac.

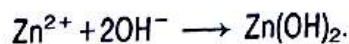


13. Précipitation et redissolution de l'oxyde d'argent par addition d'une solution d'ammoniac.

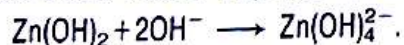
ion zinc Zn^{2+}

- Les solutions sont incolores.
- Sels de zinc insolubles : ZnS (blanc); ZnCO_3 (blanc).
- Hydroxyde de zinc $\text{Zn}(\text{OH})_2$ insoluble (blanc).
- *Test principal* : Précipitation et redissolution de l'hydroxyde de zinc $\text{Zn}(\text{OH})_2$.

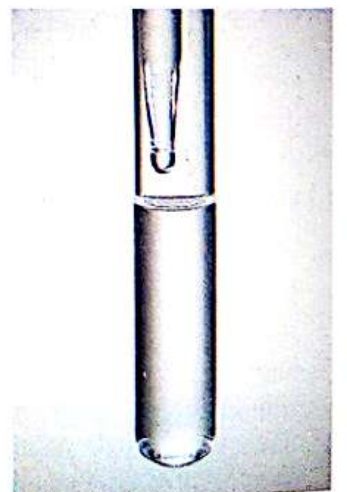
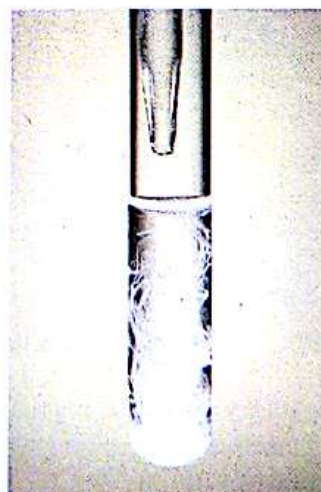
Ajouter goutte à goutte à la solution testée une solution de soude : un précipité blanc, translucide, apparaît selon :



Ajouter alors un excès de soude; le précipité se redissout par formation d'ions zincate $\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}$ selon :



- *Test complémentaire* : Répéter l'opération avec une solution d'ammoniac NH_3 qui, elle aussi, est basique. L'hydroxyde précipite et se redissout dans un excès de réactif. Ce test complémentaire est nécessaire pour différencier l'ion zinc de l'ion aluminium.



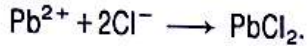
14. Précipitation et redissolution de l'hydroxyde de zinc par addition d'une solution d'ammoniac.

ion plomb II Pb²⁺

- Les solutions sont incolores.
- Sels de plomb insolubles : tous sauf le nitrate de plomb (Pb²⁺ et 2NO₃⁻). PbCl₂, PbSO₄, Pb(OH)₂ et PbCO₃ sont blancs, alors que PbS est noir.

• *Test principal* : Précipitation du chlorure de plomb II PbCl₂.

Ajouter à la solution testée 1 cm³ d'une solution de chlorure de sodium; un précipité blanc apparaît selon :

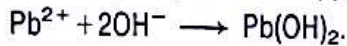


Vérifier que :

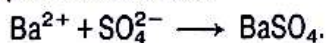
— le précipité n'est pas sensible à la lumière, au contraire de celui de chlorure d'argent;

— le précipité se redissout lorsqu'on porte la solution à l'ébullition.

• *Test complémentaire* : Précipitation de l'hydroxyde de plomb Pb(OH)₂. Ajouter à la solution testée 1 cm³ d'une solution de soude; un précipité blanc apparaît selon :

**ion baryum Ba²⁺**

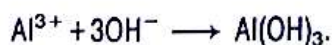
- Les solutions sont incolores.
 - Sels de baryum insolubles : BaSO₄ (blanc); BaCO₃ (blanc).
 - L'hydroxyde de baryum Ba(OH)₂ est peu soluble.
 - *Test principal* : Précipitation du sulfate de baryum BaSO₄.
- Ajouter à la solution testée un peu d'une solution de sulfate de sodium (2Na⁺ et SO₄²⁻); le sulfate de baryum forme un précipité blanc selon :



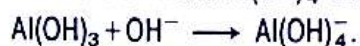
• *Test complémentaire* : Émission d'une lumière verte. Procéder comme indiqué dans la fiche de l'ion sodium.

ion aluminium Al³⁺

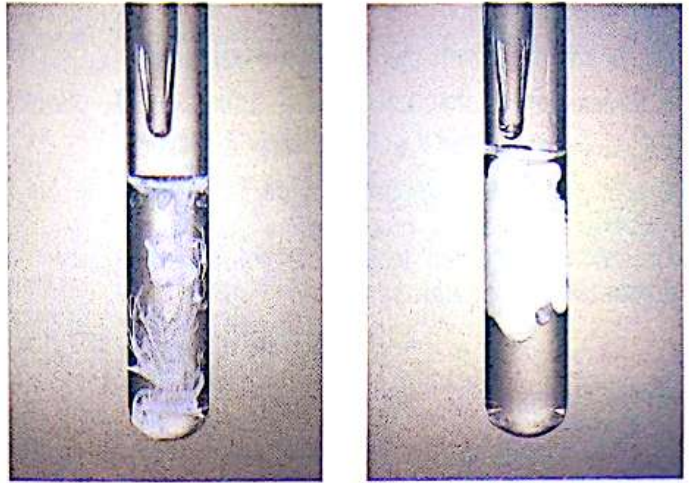
- Les solutions sont incolores.
 - Hydroxyde d'aluminium Al(OH)₃ insoluble (blanc).
 - *Test principal* : Précipitation et redissolution de l'hydroxyde d'aluminium Al(OH)₃.
- Ajouter goutte à goutte à la solution testée une solution de soude : un précipité blanc, translucide, apparaît, selon :



Ajouter alors un excès de soude; le précipité se redissout par formation d'ions aluminate Al(OH)₄⁻ selon :



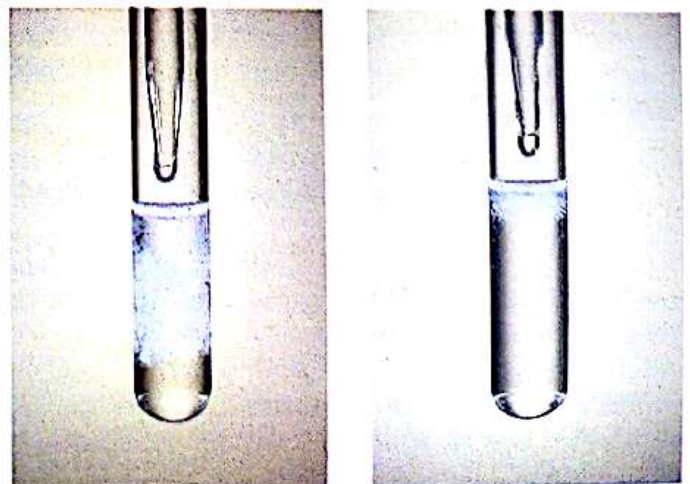
• *Test complémentaire* : Répéter l'opération avec une solution d'ammoniac NH₃; l'hydroxyde précipite mais ne se redissout pas dans un excès de réactif.



15. Précipitation du chlorure de plomb (à gauche) et de l'hydroxyde de plomb (à droite).



16. Test à la flamme de l'ion baryum.

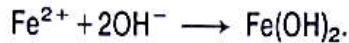


17. Précipitation et redissolution de l'hydroxyde d'aluminium par addition d'une solution de soude.

ion fer II Fe²⁺

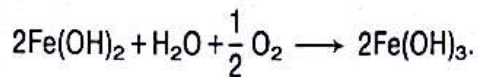
- Les solutions ont une coloration vert pâle.
- Sels de fer II insolubles : FeS (noir); FeCO₃ (blanc),
- Hydroxyde de fer II Fe(OH)₂ insoluble (vert).
- *Test principal* : Précipitation de l'hydroxyde de fer II Fe(OH)₂.

Ajouter à la solution testée une solution de soude; un précipité vert apparaît selon :



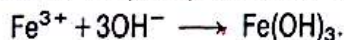
Le précipité est insoluble dans un excès de réactif.

Au contact du dioxygène de l'air, le précipité prend peu à peu une teinte rouille, car il se transforme en hydroxyde de fer III selon :

**ion fer III Fe³⁺**

- Les solutions ont une coloration brun-jaune.
- Sels de fer III insolubles : Fe(OH)₃ (rouille).
- *Test principal* : Précipitation de l'hydroxyde de fer III Fe(OH)₃.

Ajouter à la solution testée quelques gouttes d'une solution de soude : un précipité rouille apparaît selon :



Le précipité est insoluble dans un excès de réactif.

ion cuivre II Cu²⁺

- Les solutions ont une coloration bleue.
- Sels de cuivre II insolubles : CuCO₃ (bleu-vert); CuS (noir).
- Hydroxyde de cuivre II Cu(OH)₂ insoluble (bleu).
- *Test principal* : Précipitation de l'hydroxyde de cuivre II Cu(OH)₂.

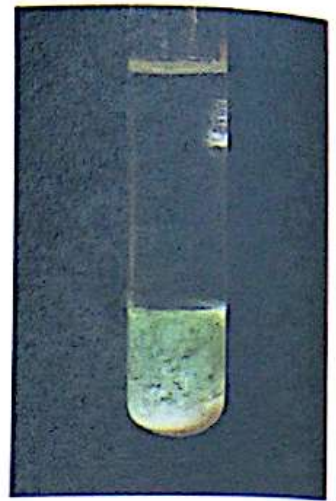
Ajouter à la solution testée quelques gouttes d'une solution de soude; un précipité bleu, gélatineux apparaît selon :



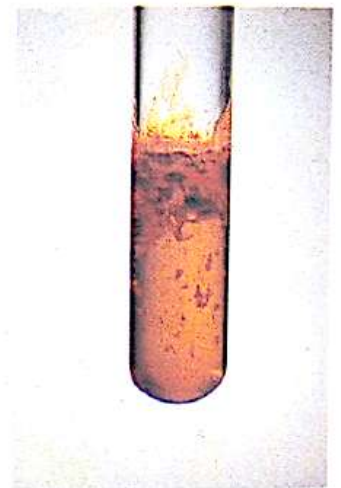
- *Test complémentaire* : Action d'une solution d'ammoniac.

Ajouter à la solution testée quelques gouttes d'une solution d'ammoniac NH₃; comme avec la soude, le précipité d'hydroxyde apparaît.

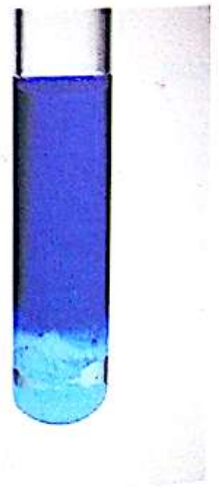
Ajouter alors un excès de réactif et agiter : le précipité se redissout tandis que la solution passe du bleu au bleu-nuit. Cette coloration et cette redissolution sont dues à la formation d'un ion complexe Cu(NH₃)₄²⁺, l'ion tétrammine cuivre II, selon :



18. Précipitation de l'hydroxyde de fer II par la soude.



19. Précipitation de l'hydroxyde de fer III par la soude.



20. Précipitation de l'hydroxyde de cuivre II (à gauche) et redissolution partielle du précipité (à droite) par addition d'une solution d'ammoniac. La redissolution est totale si l'ammoniac est en excès.

Faire le point

- Parmi les ions étudiés, quels sont ceux qui confèrent une coloration à leur solution?
- Quelle couleur absorbe une solution de sulfate de cuivre II?
- Quelle couleur émettent les ions Na^+ dans une flamme?
- Qu'appelle-t-on « ions incompatibles »? Citer trois exemples.
- Quelle est l'action des molécules NH_3 sur le précipité de chlorure d'argent? Comment s'appelle ce type de réaction?
- Comment caractérise-t-on un dégagement de sulfure d'hydrogène?
- Quelle est la réaction caractéristique des ions nitrate? Dans quelles conditions de pH faut-il opérer?
- Pour favoriser le dégagement de dioxyde de carbone d'une solution, il faut chauffer. Quel est l'effet thermique de la dissolution de ce gaz?
- Dans une solution d'hydroxyde de sodium, on ajoute quelques gouttes d'une solution de sulfate de cuivre. Qu'observe-t-on? Comment varie le pH de la solution?

37.1 Une solution colorée en jaune pâle subit les deux tests suivants :

- ajout de quelques gouttes d'une solution de chlorure de baryum : il se forme un précipité blanc;
 - ajout de quelques gouttes d'une solution d'hydroxyde de sodium : il se forme un précipité rouille.
- Indiquer la nature des ions ainsi mis en évidence. Écrire les équations-bilans.

37.2 1/ Dans une solution incolore, on ajoute une solution de nitrate d'argent : un précipité blanc apparaît. Quelle peut être sa nature?

2/ Traité par l'acide nitrique, le précipité reste insoluble et aucun dégagement gazeux n'apparaît. Que peut-on en déduire?

3/ Quels sont les tests complémentaires à effectuer pour s'assurer de la nature du précipité?

4/ Quels sont les cations que peut contenir la solution initiale?

5/ Un test à la flamme montre une coloration verte très pâle. Quel test faut-il effectuer pour identifier le cation avec certitude?

37.3 1/ Faire un schéma du montage à réaliser pour préparer le monoxyde d'azote.

2/ Quelle est la masse minimale de cuivre à utiliser pour préparer 2 l de ce gaz?

3/ Quel est le volume minimal d'acide nitrique à utiliser?

4/ On mélange ces 2 l de monoxyde d'azote avec 0,5 l de dioxygène, les deux volumes étant mesurés dans les mêmes conditions. Quelle est la composition du mélange final?

Données : volume molaire dans les conditions de l'expérience : $24 \text{ l} \cdot \text{mol}^{-1}$; concentration de l'acide nitrique : $5 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$.

37.4 On fait passer un courant de dioxyde de carbone dans 100 cm^3 d'eau de chaux contenant $1,2 \text{ g}$ d'hydroxyde de calcium par litre. Quel volume de dioxyde de carbone faut-il utiliser :

1/ pour transformer tout l'hydroxyde de calcium en carbonate de calcium qui précipite?

2/ pour obtenir une solution claire, c'est-à-dire transformer tout l'hydroxyde de calcium en hydrogénocarbonate de calcium soluble?

Données : le volume molaire dans les conditions de l'expérience est égal à $24 \text{ l} \cdot \text{mol}^{-1}$.

37.5 On dispose d'une solution de sulfate de cuivre II dont la concentration en ions sulfate est :

$$[\text{SO}_4^{2-}] = 0,15 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}.$$

On prend 10 cm^3 de cette solution que l'on traite par une solution de chlorure de baryum en excès. Quelle est la masse du précipité obtenu?

37.6 On réalise avec une solution X contenant une seule sorte d'anions et une seule sorte de cations (outre les ions OH^- et H_3O^+ en faibles concentrations) les expériences suivantes :

- X traitée par une solution de nitrate d'argent donne un précipité blanc qui se redissout dans une solution d'ammoniac;
- le test à la flamme effectuée sur X donne une coloration vert tendre;
- X traitée par quelques gouttes d'acide sulfurique donne un précipité blanc.

Quelle est la composition de la solution X? Écrire les équations des différents tests effectués.

37.7 On dispose d'une solution d'hydroxyde de potassium dont le pH est 13,0.

1/ Quelle est la composition de cette solution?

2/ On ajoute goutte à goutte cette solution dans un bécher contenant 500 cm^3 d'une solution de chlorure de zinc II à $0,015 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$. Quel volume V_1 de la solution de potasse faut-il utiliser pour précipiter la quasi-totalité des ions zinc?

3/ Que se passe-t-il si on ajoute un excès de solution basique? Quel est le volume V_2 à ajouter pour que la solution redevienne limpide?

37.8 Sur une solution Z, incolore, on effectue les tests suivants :

- ajout d'une solution de chlorure de baryum : un précipité blanc apparaît. Traité par l'acide chlorhydrique, ce solide se dissout et donne un dégagement gazeux qui trouble l'eau de chaux;
- traitée par l'acide chlorhydrique, Z donne aussi un dégagement gazeux qui trouble l'eau de chaux;
- traitée par la soude, Z donne un précipité translucide qui se redissout dans un excès de réactif.

Montrer que ces trois tests permettent l'identification sans ambiguïté des ions que contient la solution.

37.9 Un solide gris, d'aspect métallique, est traité par l'acide chlorhydrique. Un dégagement gazeux, nauséabond, se produit, qui brunit un papier imbibé d'une solution de nitrate de plomb II. On analyse la solution obtenue lorsque tout le solide a disparu :

- l'action d'une solution de nitrate d'argent conduit à un précipité blanc qui noircit à la lumière;
- l'action d'une solution de soude fournit un précipité vert foncé qui, abandonné à l'air, devient brun-roux.

Expliquer ces différentes observations et identifier le solide analysé.

Apprenons à calculer : $A = 6,400 \cdot 10^{11}$;
 $B = 2,778 \cdot 10^{-27}$; $C = -3,677 \cdot 10^{-16}$;
 $D = -3,936 \cdot 10^{15}$; $L_D = 1,615 \cdot 10^{-35}$;
 $G = 5,556 \cdot 10^{-8}$; $L = 2,445 \cdot 10^{-8}$;
 $E = 0,511$; $H = 1,001$; $\mu = 9,338 \cdot 10^{-24}$.

1.3 $\text{Sn}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Sn}$ (cathode);
 $2\text{Cl}^- \rightarrow 2e^- + \text{Cl}_2$ (anode).

1.5 A la cathode, dépôt de cuivre; à l'anode, dégagement gazeux de O_2 . Si on inverse le sens du courant, le dépôt de cuivre disparaît et apparaît sur l'autre électrode.

1.8 A la cathode, $\text{Ag}^+ + e^- \rightarrow \text{Ag}$;
 $1,39 \cdot 10^{19} e^- \cdot \text{s}^{-1}$.

1.11 A la cathode, $\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cu}$;
 $4 \cdot 10^{20} e^- \cdot \text{s}^{-1}$.

1.13 Excès de $6,25 \cdot 10^9 e^-$.

1.15 $-4 \cdot 10^{-8} \text{ C}$.

1.17 $-9,6 \cdot 10^{-6} \text{ C}$.

1.20 Le barreau de verre possède un défaut d' e^- ; il accapare des e^- non liés du barreau métallique qui se charge donc positivement, de même que la boule de sureau, alors repoussée.

1.22 B chargé négativement et A positivement.

2.2 $Q = I \cdot t = 8,64 \cdot 10^{-2} \text{ C}$.

2.4 $Q = 2,625 \text{ Ah} = 9450 \text{ C}$.

2.6 1/ $d = 3,125 \cdot 10^{19} e^- \cdot \text{s}^{-1}$.
 2/ Vitesse d'ensemble : $v = 0,037 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

2.11 $I = 4,3 \text{ mA} = 4,3 \cdot 10^3 \mu\text{A}$.

2.12 $5,8 \text{ mA} < I < 5,9 \text{ mA}$.

2.14 1/ Il est utilisé en ampèremètre. 2/ Calibre 200 mA. 3/ $I = 8,5 \text{ mA}$. 4/ On peut utiliser le calibre 20 mA seulement.

2.16 1/ Sélecteur sur =; calibre 0,3 A.
 2/ $I = 0,180 \text{ A}$. 3/ $\Delta I = 0,005 \text{ A}$ et $\Delta I/I \approx 2,5\%$.

2.18 1/ Calibre 1 A; $I = 0,015 \text{ A}$; $I = 0,38 \text{ A}$;
 $\Delta I/I = 3,9\%$. 2/ La meilleure mesure est la seconde; résultats compatibles.

2.20 1 h 13 min 41 s.

2.21 2/ I correspond à 0,77 A; on lit 0,76 A.
 $\Delta I = 0,02 \text{ A}$. L'appareil est correctement gradué.

2.24 1/ 70 h. 2/ 933 h.

3.1 A l'incertitude de mesure des appareils.

3.3 0,2 A; la branche principale contient le générateur.

3.4 $I = 0,91 \text{ A}$; $I_1 = I_2 = I_3 = 0,24 \text{ A}$; $I_4 = 0,19 \text{ A}$.

3.6 2,8 A.

3.8 1/ 0,8 A. 2/ 0,4 A.

3.10 On les place en parallèle.

3.12 1/ $I_{BC} = 3 \text{ A}$; $I_{GB} = 4 \text{ A}$; $I_{DF} = 0,5 \text{ A}$;
 $I_{CF} = 1 \text{ A}$. 2/ $d = 2,5 \cdot 10^{19} e^- \cdot \text{s}^{-1}$.

3.14 $I = 0$ dans L_2 , L_3 et D_4 ; 0,3 A dans f et f' .

3.17 $I_1 = I_2 = 0,15 \text{ A}$; $I_3 = I_4 = I_5 = 0,1 \text{ A}$;
 $I_6 = 0,3 \text{ A}$.

3.19 $\Delta I = 1,5 \text{ mA}$. On peut écrire $I_1 = I_2 + I_3$.

4.2 Il faut 2 ampèremètres et 1 voltmètre.

4.4 $u_{FE} > 0$; $u_{AF} < 0$; $u_{AB} > 0$; $u_{CB} < 0$; $u_{DE} = 0$;
 $u_{CD} > 0$; $u_{AE} > 0$.

4.6 1/ Sélecteur sur =; 15 V. 2/ 9,2 V. 3/ Non.

4.8 1/ Calibre 15 V. 2/ Graduation de 0 à 15.
 3/ Déviation $d \approx 4,5$; $U = 4,5 \text{ V}$. 4/ Non, le calibre 5 V est mieux adapté.

4.10 Voltmètre : $\Delta U = 0,075 \text{ V}$; $\Delta U/U = 2,8\%$.
 Multimètre : sur calibre 15 V : $\Delta U = 0,225 \text{ V}$;
 $\Delta U/U = 5\%$.

4.11 1/ Sélecteur sur =. 2/ Calibre 10 V.
 3/ 3,6 V. 4/ 4,2%.

4.14 $u_{BC} = -14 \text{ V}$.

4.15 $u_{AB} = 4 \text{ V}$; $u_{DE} = 2 \text{ V}$; $u_{BC} = 0 \text{ V}$. On ne modifie pas le réseau si on court-circuite B et C.

4.18 1/ $u_{PN} = 24 \text{ V}$; $u_{BD} = 0 \text{ V}$; $u_{AB} = u_{BC} = u_{AD} = u_{DC} = 12 \text{ V}$. 2/ $u_{BD} = 0 \text{ V}$; aucun effet.

4.19 $u_{BA} = 0 \text{ V}$; $u_{AC} = 3 \text{ V}$; $u_{DA} = 3 \text{ V}$; la lampe est éteinte.

4.21 1/ $u_{CF} = u_{BG} = 10 \text{ V}$; $u_{FD} = -6 \text{ V}$;
 $u_{DE} = 6 \text{ V}$. 2/ De B vers G; de C vers F; de C vers D; de D vers F; de D vers E.

4.24 2/ $u_{AB} = -0,6 \text{ V}$; calibre 1 V; $k = 0,2 \text{ V/div}$.

5.1 1000 Hz.

5.3 Valeur efficace : 220 V; valeur maximale : 311 V.

5.5 1/ Variable, non sinusoïdale.
 2/ $T = 3 \times 5 \cdot 10^{-3} = 15 \text{ ms}$; $N = 66,7 \text{ Hz}$. 3/ En valeur absolue : $U_{\text{max}} = 2,8 \times 2 = 5,6 \text{ V}$. La tension n'est pas sinusoïdale; on ne peut appliquer $U \cdot \sqrt{2} = U_{\text{max}}$.

5.8 1/ $U = 8,485 \approx 8,5 \text{ V}$. 2/ 0,5 ms. 3/ a/ Trait vertical d'amplitude 4,25 div. de part et d'autre de la ligne médiane horizontale. 3/ b/ Sinusoïde dont la période s'étale sur 5 div.

5.9 1/ Rouge de 0 à 150. 2/ 13,2 V; 18,7 V.
 3/ $\Delta U = 0,3 \text{ V}$; $\Delta U/U = 2,3\%$.

5.11 1/ En dérivation. 2/ Tensions efficaces.
 3/ 1000 V (ACA) et 200 V (ACA). 4/ 220 V et 13,7 V. 5/ $\Delta U_1/U_1 = 2,1\%$; $\Delta U_2/U_2 = 2,9\%$.

6.2 $R = 13 \Omega$.

6.3 $G = 6 \text{ mS}$.

6.6 3/ $R = 25 \Omega$.

6.8 1/ $R = 2 \Omega$; $G = 0,5 \text{ S}$.

6.10 1/ $I = 0,67 \text{ A}$. 2/ $U = 0,72 \text{ V}$.

6.12 1/ $u_{BA} = 0,4 \text{ V}$. 3/ $G = 0,0133 \text{ S}$.

6.14 $I_1 = 0,6 \text{ A}$; $I_2 = 1,2 \text{ A}$; $I_3 = 0,8 \text{ A}$; $I_4 = 0,4 \text{ A}$;
 $R = 3,33 \Omega$.

6.16 $\mathcal{P} = u \cdot I = u^2/R = 1,5 \text{ W}$.
 2/ $\mathcal{P} = I^2/G = 180 \text{ W}$.

6.18 $I = \sqrt{3IR} = 0,41 \text{ A}$; 0,21 A; 0,13 A.
 $U = \sqrt{3P \cdot R} = 4,9 \text{ V}$; 9,7 V; 15,5 V.

6.20 1/ $I = \mathcal{P}/U = 2,73 \text{ A}$. 2/ $R = 80,7 \Omega$.
 3/ $d = 0,48 \text{ mm}$.

6.23 $I = -0,43 + 0,143 \cdot u_{AB}$.

7.1 $E = 3,8 \text{ V}$; $r = 1,2 \Omega$; $u_{PN} = 3,8 - 1,2 \cdot I$.

7.3 $u_{PN} = 9 - 2,4 \cdot I$.

7.5 4,45 V; 1 Ω ; 4,45 A.

7.7 (1,6 V; 0,5 Ω); (1,2 V; 0,5 Ω).

7.9 $u_{PN} = 4,51 - 1,8 \cdot I$.

7.11 $0,46 \text{ V} < u_{PN} < 0,53 \text{ V}$, $u_{PN} = 0,53 - 0,12 \cdot I$;
 $0 \text{ V} < u_{PN} < 0,36 \text{ V}$, $u_{PN} = 13,5 - 18 \cdot I$.

7.13 $Q \approx 28720 \text{ C}$; $t = Q/I = 57440 \text{ s} \approx 16 \text{ h}$.

7.14 2/a/ $0 < I < 200 \text{ mA}$; $u_{PN} = 15 \text{ V}$, $\forall I$; $r = 0$.

8.1 100 Ω ; $-I = 100 \text{ mA}$; $u_1 = 4,9 \text{ V}$; $u_2 = 5,1 \text{ V}$.

8.3 $R = R_1$.

8.5 1/ 5,32 Ω . 2/ $I = 3,76 \text{ A}$; $I_1 = 2,22 \text{ A}$;
 $I_2 = 1,54 \text{ A}$.

8.7 1/ 33 V. 2/ 660 Ω .

8.9 1/ $R_x = R_1 \cdot I_1/I_x$. 2/ $R_x = 690,6 \Omega$.
 3/ $\Delta I = 6 \text{ mA}$; $\Delta R_x \approx 42 \Omega$.

8.11 1/ Oui; schématisation différente.
 2/ $u_{EF} = 0 \text{ V}$. 3/ $R_{\text{équivalente}} = R$.

8.13 1/ $R = 0,57 \Omega$; $R_{AB} = 2,79 \Omega$. 2/ $I = 2,15 \text{ A}$;
 $u_{CB} = 1,23 \text{ V}$; $I_1 = 0,61 \text{ A}$; $I_2 = 1,23 \text{ A}$; $I_3 = 0,31 \text{ A}$.

8.16 1/ Loi des nœuds en C, D, A et B;
 $I_{CD} = 0 \text{ A}$. 2/ $R_{\text{équivalente}} = R$.

8.19 1/ $E = 4,5 \text{ V}$; $R = 48,5 \Omega$. 3/ $I_{CC} = 92,8 \text{ mA}$.

8.22 $E = 9 \text{ V}$; $r = 3 \Omega$.

8.24 1/ $E = 6 \text{ V}$; $r = 2 \Omega$. 2/ 4,22 V et 1,38 V.

8.27 Deux accumulateurs sont en opposition;
 $E = 1,62 \text{ V}$.

9.1 $I = 0,5 \text{ A}$; $u = 1,95 \text{ V}$.

9.3 $R = 4,9 \Omega$; $r = 0,1 \Omega$.

9.4 $r = 5 \Omega$.

9.6 1/ $I_{CC} = 5,5 \cdot 10^{-6} \cdot \theta$. 2/ $I = 5 \cdot 10^{-7} \cdot \theta$;
 $\theta = 270^\circ \text{ C}$. 3/ Non; $I = 15 \text{ mA}$.

9.8 $E = 4,6 \text{ V}$; $R = 13,6 \Omega$; $r = 1,7 \Omega$.

9.10 1/ $R = (E/I_M) - r - R_A$.
 2/ $I/I_M = R_0/(R_0 + X)$. 3/ $X = R_0[(100/n) - 1]$.
 4/ $R = 1249 \Omega$; $X = 500 \Omega$.

9.12 2/ (2 V; 0,3 A).

9.14 2/ (0,13 A; 1,4 V).

9.17 1/ Actifs : a et d; passifs : b et c.
 2/ a avec c; c et b avec d.

9.19 1/ $I = 254 \text{ mA}$.

9.20 2/ $u_{AB} = 1,2 \text{ V}$; $I_{(12 \Omega)} = 0,10 \text{ A}$;
 $I_{(24 \Omega)} = 0,05 \text{ A}$; $I_{(20 \Omega)} = 0,15 \text{ A}$.

9.22 1/ Le courant sort par la borne +;
 $I = 0,6 \text{ A}$. 2/ $u_{AB} = 0 \text{ V}$. 3/ $I = 0 \text{ A}$.

9.24 2/ $I = 0,208 \text{ A}$; l'intensité dans chaque générateur est 0,104 A.

10.2 1/ P ouvert : DEL verte allumée; P fermé :
 DEL rouge allumée. 2/ 10,2 mA; 9,5 mA.

10.4 2/ (0, 0, 0); (0, 1, 0); (1, 0, 0); (1, 1, 1).
 3/ Oui.

- 10.6 $I_0 = 7 \text{ mA}$; $R \leq 1414 \Omega$; $I_d = 3 \text{ mA}$; $R \geq 3700 \Omega$.
- 10.8 2/ En pleine lumière : $I \geq 15 \text{ mA}$; $R \leq 900 \Omega$ pour déclencher le relais et $R \geq 500 \Omega$ pour protéger la photorésistance. Dans l'obscurité : $I < 13 \text{ mA}$; le relais se désenclenche.
- 10.10 $R = 1 \text{ M}\Omega$, $u = 9,9 \text{ mV}$; $R = 1 \text{ k}\Omega$, $u = 3,1 \text{ V}$.
- 10.12 $\theta = 90^\circ \text{C}$.
- 10.13 1/ $I_F = 0$; $I_F = 8,8 \cdot 10^{-3} (U_F - 0,8)$. 2/ a/ $u_{AC} < 0$, $I_R = 0$; $0 < u_{AC} < 1,6 \text{ V}$, $I_F = 0$; $u_{AC} > 1,6 \text{ V}$, $I_F = 4,1 \cdot 10^{-3} (U_F - 1,7)$.
- 10.15 A 25°C : $U_F = 1,65 \text{ V}$; $R = 368 \Omega$.
- 10.16 Diode passante pour $u \geq 0,8 \text{ V}$. u' varie de $-1,5 \text{ V}$ à $0,8 \text{ V}$.
- 10.20 1/ $R = 200 \Omega$. 4/ $I = (E - U_Z)/R$, soit $I = 5 \cdot 10^{-3} \cdot E - 5 \cdot 10^{-2}$.
- 11.1 R_P évite la destruction du transistor par un courant base trop important.
- 11.4 Inverser le générateur.
- 11.6 Premier cas.
- 11.8 e, c, a, b, d, f.
- 11.10 (0, 0, 0, 1).
- 11.12 1/ 158 mA. 2/ 1,3 mA. 3/ Bloqué; $u_{BE} = 0 \text{ V}$; $I_C = 0 \text{ A}$.
- 11.14 1/ Mesures de I_B , I_C , u_{BE} . 2/ Bloqué; régime linéaire; saturé. 3/ $\beta = 150$.
- 11.16 2/ $R_B = 1,77 \cdot 10^5 \Omega$; $R_C = 1333 \Omega$.
- 11.17 1/ 11,3 μA et 11,3 mA. 2/ 1,7 mA et 1,7 A. 3/ Oui. 4/ $R = 42 \text{ k}\Omega$ (pénombre).
- 11.19 $I_B = 10,2 \mu\text{A}$; $I_C = 1,02 \text{ mA}$; $u_{CE} = 11,5 \text{ V}$.
- 11.22 1/ $I_B = 0,236 \text{ A}$ pour $R = 100 \Omega$; $I_B = 0,236 \text{ mA}$ pour $R = 100 \text{ k}\Omega$. 2/ $R_C = 125 \Omega$; $R_B = 17800 \Omega$. 3/ $I_B = 1,92 \text{ mA}$; $R_B = 592 \Omega$.
- 11.24 1/ $R_1 = 2786 \Omega$; $R_2 = 140 \Omega$ à 60°C . 2/ $u_{BE} = 0,21 \text{ V} < U_{\text{sat}}$.
- 12.1 $I = e/R_1$; $v_s = (R_1 + R_2) \cdot I$; $v_s/e = 1 + R_2/R_1$.
- 12.2 $v_s/e = 1$; adaptateur d'impédance; ne consomme aucun courant si on utilise la tension e comme signal.
- 12.3 2/ $v_s = e - (R' + R) \cdot I$. 4/ $v_s/e = -(R'/R)$.
- 12.4 $I_i = k_i \cdot e_i/R$; $v_s = -R \sum I_i$.
- 13.1 4/ Dans \mathcal{R} : $M(2, 3)$, $M'(4, 1)$; dans \mathcal{R}' : $M(0, 5)$; $M'(2, 3)$.
- 13.3 1/ En faute : $v = 69,7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. 2/ 72 s.
- 13.5 1/ 100,8 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ et 102,4 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$. 2/ 277,8 m et 257,8 m.
- 13.7 139,7 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$.
- 13.9 2/ $3,565 \cdot 10^5 \text{ km} < d < 4,068 \cdot 10^5 \text{ km}$.
- 13.11 1/ 1 mille = 1,652 km; 1 nœud = 1,852 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$. 2/ $v = 1 \text{ nœud}$.
- 13.14 $v_A = 40 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; $v_B = 60 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; $\vec{v}_B = 1,5 \vec{v}_A$.
- 13.17 $v = 40 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; longueur 2 cm.

- 13.18 1/ $v_C = 62,5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. 2/ Rectiligne uniforme, curviligne varié, rectiligne uniforme.
- 13.20 La bouée parcourt 5 km.
- 14.3 $\vec{F}_{12} + \vec{F}_{21} = \vec{0}$.
- 14.5 1/ $k = 87,5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$. 2/ 2,75 N.
- 14.7 10 cm.
- 14.10 $F = 250 \cdot (\ell - \ell_0)$ avec F en N, ℓ en m, $k = 250 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, $\ell_0 = 0,1 \text{ m}$.
- 14.11 $\|\vec{F}\| = 10,4 \text{ N}$.
- 14.12 $F = 11,18 \text{ N}$; $\tan \alpha = 0,5$, $\alpha = 26,6^\circ$.
- 14.15 1/ $\vec{F} = 2\vec{i} + \vec{j}$. 2/ $F = 2,24 \text{ N}$; $\sin \alpha = Y/F$; $\cos \alpha = X/F$; $\alpha = 26,6^\circ$.
- 14.17 $F = 20\sqrt{2} \text{ N}$; bissectrice de (\vec{F}_3, \vec{F}_4) .
- 14.19 2/ $F_1 = \sqrt{13} \text{ N}$; $F_2 = \sqrt{5} \text{ N}$. 3/ $(\vec{F}_1, \vec{F}_2) = -60,2^\circ$. 5/ $\vec{F}' = -\vec{i} + 5\vec{j}$.
- 15.12 $F = 4,7 \cdot 10^5 \text{ N}$ (tenir compte de la pression atmosphérique).
- 15.13 1/ 7160 N. 2/ 2190 N. 3/ 4970 N.
- 15.14 0,51 N.
- 15.15 $P_T = 569 \text{ N}$; $P_L = 94 \text{ N}$.
- 15.17 3/ $d = 342000 \text{ km}$ du centre de la Terre.
- 15.18 Opposées à \vec{v} ; neige et air; son poids.
- 15.19 2/ $F_1 < F_2$; $F_3 \ll F_1$; les forces de frottement dépendent du poids de l'objet; les rouleaux diminuent les forces de frottement.
- 15.22 2/ $F \approx 4472 \text{ N}$; $63,4^\circ$.
- 15.23 2/ $T' = 3,15 \text{ N}$.
- 16.2 Ce sont en fait les actions conjuguées du sol et du postérieur de l'individu qui provoquent l'effondrement de la chaise; le poids agit sur l'individu et non directement sur la chaise.
- 16.9 $\vec{F}_{B \rightarrow A}$ est directement opposée à $\vec{F}_{A \rightarrow B}$.
- 16.10 Toutes les forces ont même norme.
- 16.12 1/ $\vec{F}_1 = \vec{F}$: ressort $\rightarrow S_1$; $\vec{F}_3 : S_1 \rightarrow R$; $\vec{F}_2 : S_2 \rightarrow R$; $\vec{F}_2 : R \rightarrow S_2$; \vec{P}_1 et \vec{P}_2 : poids; \vec{R}_1 : air $\rightarrow S_1$; \vec{R}_2 : air $\rightarrow S_2$. 2/ \vec{F}_1 et \vec{F}_3 ; \vec{F}_2 et \vec{F}_2 .
- 16.14 1/ M_2 entraîne M_1 . 2/ $F_1 = F_2$.
- 16.15 En A, les forces sont directement opposées (interaction).
- 17.2 1 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- 17.3 1/ Rectiligne uniforme. 2/ Action de la planète.
- 17.4 Sur P_2 , mouvement accéléré; sur P_3 , mouvement rectiligne uniforme.
- 17.5 Approximativement, mouvement circulaire uniforme; ce n'est pas un système isolé; rotation.
- 17.7 Distance entre deux pointés : 4 cm.
- 17.10 1/ Rectiligne uniforme; $v = 35 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. 2/ 2 tours en 5/3 de seconde; 1 tour en 0,833 s.
- 17.11 2/ A la date t_7 , 1/2 tour. 4/ $v(t_2) = 68,3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; $v(t_5) = 16,7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.
- 17.13 2/ $v_G \approx 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 3/ Rotation uniforme.

- 17.15 Au tiers de $G_1 G_2$, du côté de la plus grande masse.
- 17.16 40 g.
- 17.19 A 10 cm de l'extrémité libre du bois.
- 17.20 2/ A 450 km du centre d'inertie du Soleil.
- 17.22 \vec{AG} (a/2; 7a/9).
- 18.1 $\rho = 3,03 \cdot 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- 18.3 $\rho = 16,4 \cdot 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- 18.5 1/ $\rho = 1,77 \cdot 10^{29} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. 2/ Non. 3/ v_G est constant mais \vec{v}_G varie.
- 18.8 $\rho = 0,6 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; $v = 0,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- 18.9 $v = 0,133 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- 18.11 $v_1 = 50 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; $v_2 = 36,2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.
- 18.13 $m_{\text{He}} = 4 m_p$; 2 neutrons.
- 18.15 1/ $v_A = 25 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$; $v_B = 55 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. 2/ $\rho = 0,21 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- 18.17 3/ $\rho_2 = \rho_4 \approx 0,84 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; le système est pseudo-isolé.
- 18.18 2/ $\alpha = 27,5^\circ$; $v_2 = 0,18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- 18.20 $v_B = 1,385 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $v_A = 1,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- 19.1 3/ Non; ce sont les actions du sol sur les roues qui vont provoquer la variation de la quantité de mouvement de la bicyclette.
- 19.5 1/ Poids du voilier; action de l'eau sur la coque. Si $\vec{\Delta p} = \vec{0}$, alors $\vec{R} + \vec{P} = \vec{0}$. 2/ La somme $\vec{F}_{\text{vent}} + \vec{P} + \vec{R}$ est dirigée suivant $\vec{\Delta p}$. Le voilier accélérant, cette force est horizontale, dirigée dans le sens de déplacement du bateau.
- 19.8 1/ $\vec{\Delta p} = \vec{0}$; $\vec{R} + \vec{P} = \vec{0}$. 2/ $(\vec{R} + \vec{P})$ colinéaire à $\vec{\Delta p}$; $\|\vec{R}\|$ a été modifiée.
- 19.9 \vec{R} est dirigée vers l'intérieur du virage de telle façon que $\vec{R} + \vec{P}$ soit parallèle à $\vec{\Delta p}$.
- 19.11 2/ Action dirigée suivant la bissectrice de l'angle formé par les deux directions.
- 19.13 $\Delta p = 816 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- 19.15 2/ $\vec{\Delta v}(t_2) = -0,39\vec{i}$, longueur 3,15 cm. 3/ $\Delta p = m \cdot \Delta v = -0,27\vec{i}$.
- 19.17 2/ $\vec{\Delta p}(t_4)$ est dirigée suivant OA_4 ; $\|\vec{\Delta p}\| = 2,6 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, longueur 3,25 cm.
- 20.4 Le poids de S n'est pas négligeable, car les fils n'ont pas la même direction.
- 20.6 Le bateau est soumis à un couple car les deux forces n'ont jamais très exactement la même droite d'action.
- 20.7 $\ell_1 = 11,25 \text{ cm}$; $\ell_2 = 18,75 \text{ cm}$; $F_1 = F_2 = 1,25 \text{ N}$.
- 20.13 $\tan \alpha = 0,42$; $\alpha = 22,8^\circ$.
- 20.14 2/ $R_x = -0,25 \text{ N}$; $R_y = 0,43 \text{ N}$.
- 20.16 1/ $\vec{R} + \vec{P} = \vec{0}$ et colinéaires.
- 20.19 2/ 3,7 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- 20.20 2/ Non, car à l'équilibre \vec{F}_A et $m\vec{g}$ sont directement opposées.
- 20.22 $V_1/V = 0,47$.
- 20.24 1/ 3439 g.

364 21.1 $F = 360 \text{ N}$; $(\vec{F}_1, \vec{F}_2) = 124^\circ$.

21.3 $F_3 = 1200 \text{ N}$; $F_2 = 1039 \text{ N}$.

21.6 $T = 5,66 \text{ N}$; $m_1 = m_2 = 400 \text{ g}$; ne dépend pas de g .

21.8 1/ $l = 11,55 \text{ cm}$. 2/ $T = 1,55 \text{ N}$. A 25,4 cm de O_1O_2 .

21.11 $x = 0,098 \cdot \sin \alpha$; $x = 7 \text{ cm}$ pour $\alpha = 45,6^\circ$.

21.14 1/ $\vec{F}_{S \rightarrow R} = \vec{P}$. 2/ $\vec{R} = \vec{F}_{S \rightarrow R} - \vec{P}$; $R = 5 \text{ N}$. 3/ $R = 20 \text{ N}$.

21.16 1/ $F = P \cdot \tan \alpha$; $\alpha = 26,5^\circ$. 2/ 0,01 N; $T = 0,022 \text{ N}$.

21.19 1/ $R = 3000 \text{ N}$. 2/ $R = 3059 \text{ N}$; fait un angle de $11,3^\circ$ avec la verticale et support passant par le milieu de AB .

21.21 $T_A = R_C$; \vec{R}_C dirigée suivant CG ; $T_A = 17,3 \text{ N}$.

22.1 2/ $\mathcal{M}_1 + \mathcal{M}_2 + \mathcal{M}_3 = 0$.

22.3 1/ $\mathcal{M}_O = 15 \text{ N.m}$. 2/ $\mathcal{M}_O = 32,14 \text{ N.m}$. 3/ $F = 11333 \text{ N}$. 4/ $\alpha = -153^\circ$. 5/ $F = 600 \text{ N}$.

22.5 3072 N.m.

22.6 60 N.

22.7 14,4 N.m; force orthogonale au plan formé par Δ et Δ' .

22.8 1/ $\mathcal{M}_1 = -2,72 \text{ N.m}$; $\mathcal{M}_2 = -8,01 \text{ N.m}$; $\mathcal{M}_3 = 0 \text{ N.m}$.

22.9 $\approx 2,5 \text{ N}$.

23.1 0,125 kg.

23.3 6,25 N.

23.5 1/ 0,22 N.m. 2/ 187,5 g. 3/ Barre en équilibre.

23.7 2/ $T_{CC} = 25 \text{ N}$. 3/ $T_{AA} = 15 \text{ N}$.

23.9 $P = 600 \text{ N}$; $AG = 2 \text{ m}$.

23.13 1/ A l'équilibre: $\vec{R}_A + \vec{F} + \vec{R}_O = \vec{0}$; \vec{R}_O parallèle aux autres forces. 2/ $F = OA \cdot R_A/OB$.

23.15 $F = 200 \text{ N}$; $800 \text{ N} \leq R \leq 1200 \text{ N}$.

23.17 1/ $F = 20 \text{ N}$. 2/ $k = 250 \text{ N.m}^{-1}$.

23.19 $R = 2800 \text{ N}$; $R'_x = 100 \text{ N}$; $R'_y = 2073 \text{ N}$; $R' = 2975 \text{ N}$; angle de 2° avec la verticale.

25.4 ${}^4\text{He}^{2+}$.

25.5 $\rho = 2,3 \cdot 10^{17} \text{ kg.m}^{-3}$.

25.6 $R = 1800 \text{ m}$.

25.8 $26m_e/m_n = 2,55 \cdot 10^{-4}$; 0,255 g; $\approx 3920 \text{ kg}$.

25.9 $2,74 \cdot 10^{-4}$; $2,74 \cdot 10^{-4}$; $2,12 \cdot 10^{-4}$.

26.1 ${}^{28}\text{Si}$; 14^e colonne; $(K)^2(L)^8(M)^4$.

26.3 KCl et CaCl_2 .

26.5 MgO.

26.6 $m_{\text{Na}} = m_{\text{K}} = 2,52 \cdot 10^{18} \text{ kg}$.

26.10 $1,04 \cdot 10^{-8} \text{ g}$.

27.2 55,556 mol; $334,4 \cdot 10^{23}$ molécules.

27.3 32; 50; 32; 36; 10.

27.4 56; $M = 284 \text{ g.mol}^{-1}$; 0,528 mol; $3,18 \cdot 10^{23}$ molécules.

27.7 50,0 mol; 0,394 mol; 0,840 mol; 0,112 mol.

27.8 Air non pollué ($3,75 \mu\text{mol.l}^{-1}$).

28.2 1/ $(K)^2(L)^8(M)^{18}(N)^7$; 2/ $|\vec{B}_r - \vec{B}_l|$.

28.7 1/ CCl_4 . 2/ Tétragonal.

28.8 1/ 66,7 pour O; 33,3 pour C. 2/ 72,7 pour O; 27,3 pour C.

28.11 1/ $(K)^2(L)^8(M)^{18}(N)^6$. 3/ Non; cyclique.

28.13 1/ $(\text{C}_3\text{HN})_n$. 3/ $|\text{N}=\text{C}-\text{C}=\text{C}-\text{H}$.

28.15 1/ 99,4 pm. 2/ 114,15 pm. 3/ 213,55 pm.

29.2 $2\text{Na} + \text{Cl}_2 \rightarrow 2\text{NaCl}$;

$2\text{Al} + 3\text{Br}_2 \rightarrow 2\text{AlBr}_3$;

$2\text{Na} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Na}^+ + 2\text{OH}^- + \text{H}_2$;

$2\text{Fe} + 3\text{Cl}_2 \rightarrow 2\text{FeCl}_3$.

29.4 2/ 765 t.

29.6 $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11} \rightarrow 12\text{C} + 11\text{H}_2\text{O}$; 20,6 g.

29.8 2/ $m_{\text{Al}} = 242 \text{ g}$; $m_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = 715 \text{ g}$.

29.9 $m_{\text{U}} = 881,5 \text{ g}$; $m_{\text{HF}} = 296,3 \text{ g}$;

$m_{\text{Ca}} = 297,0 \text{ g}$.

30.1 500 cm^3 ; 0,4 g.

30.3 $V_{\text{H}_2} = 683 \text{ l} = 2V_{\text{O}_2}$.

30.5 2/ 915 g; 3/ 250 l; 144,3 l.

30.6 1/ $46,64 \cdot 10^3 \text{ m}^3$. 2/ 4400 t.j^{-1} .

30.9 $V_{\text{CH}_4} = 1867 \text{ m}^3$.

30.11 617,1 l; 1440,8 g.

30.13 1/ $2\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$. 2/ 30,4 g.

31.2 4 motifs.

31.4 1/ KBr. 2/ $m_{\text{K}} = 11,73 \text{ g}$; $m_{\text{Br}_2} = 23,97 \text{ g}$.

31.6 1/ 1,15 g. 2/ 2,93 g.

31.7 1/ 300 kg. 2/ 1,67 cm.

31.9 1/ $13,1 \mu\text{mol.l}^{-1}$. 2/ 0,0026 %.

32.1 $C = 1,538 \text{ mol.l}^{-1}$.

32.4 3/ $[\text{K}^+] = 0,810 \text{ mol.l}^{-1}$; $[\text{Cl}^-] = 0,268 \text{ mol.l}^{-1}$; $[\text{SO}_4^{2-}] = 0,271 \text{ mol.l}^{-1}$.

32.5 28 mg.

32.7 $[\text{SO}_4^{2-}] = [\text{NH}_4^+] = 2[\text{Fe}^{2+}] = 4 \cdot 10^{-2} \text{ mol.l}^{-1}$.

32.10 $\Delta V = -86 \text{ cm}^3$; $C = 428 \text{ g.l}^{-1}$, ou $7,14 \text{ mol.l}^{-1}$.

32.12 $[\text{Cl}^-] = 2[\text{Pb}^{2+}] = 0,036 \text{ mol.l}^{-1}$.

32.15 Dissolution exothermique.

32.16. 3/ $[\text{Li}^+] = 2[\text{CO}_3^{2-}] = 0,338 \text{ mol.l}^{-1}$.

32.18 1/ 16,8 g. 2/ 5,30 l. 3/ $\Delta t = 10 \text{ h } 33 \text{ min}$.

33.2 2,0; 3,52; 1,86; 2,0.

33.4 0,106 l.

33.5 $[\text{H}_3\text{O}^+] = [\text{Cl}^-] = 5 \cdot 10^{-3} \text{ mol.l}^{-1}$; $\text{pH} = 2,3$.

33.8 $\text{pH final} \approx 5$.

33.10 $m_{\text{Zn}} = 14,6 \text{ g}$; $m_{\text{Fe}} = 12,4 \text{ g}$; $m_{\text{Al}} = 4,0 \text{ g}$.

33.12 1/ $\text{CaCO}_3 + 2\text{H}_3\text{O}^+ \rightarrow \text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}^{2+}$. 2/ 89,38 g.

33.13 2/ 6460 C; 0,757. 3/ $[\text{H}_3\text{O}^+] = 1,888 \text{ mol.l}^{-1}$.

34.1 $C = 0,5 \text{ mol.l}^{-1}$.

34.3 Pour $\text{pH} = 12$: $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-12} \text{ mol.l}^{-1}$; $[\text{OH}^-] = 10^{-2} \text{ mol.l}^{-1}$.

34.5 $C_A = 10^{-4} \text{ mol.l}^{-1}$; $C_B = 3,13 \cdot 10^{-3} \text{ mol.l}^{-1}$; $C_C \approx 10^{-1} \text{ mol.l}^{-1}$.

34.8 12,0; 11,5; 13; 11,7.

34.10 $[\text{OH}^-]_1 = 10,0 \cdot 10^{-6} \text{ mol.l}^{-1}$; $[\text{OH}^-]_2 = 6,3 \cdot 10^{-6} \text{ mol.l}^{-1}$.

34.11 2/ 9,75 mg. 3/ 80 cm^3 ; $[\text{SO}_4^{2-}] = 3,33 \cdot 10^{-3} \text{ mol.l}^{-1}$; $[\text{Na}^+] = 6,66 \cdot 10^{-3} \text{ mol.l}^{-1}$.

34.13 2/ 119 h. 3/ 124,5 l.

35.2 2/ $[\text{H}_3\text{O}^+] = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ mol.l}^{-1}$; $[\text{OH}^-] = 4 \cdot 10^{-13} \text{ mol.l}^{-1}$.

35.4 1/ $n_{\text{H}_3\text{O}^+} = 10^{-3} \text{ mol}$; $n_{\text{OH}^-} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$. 4/ $\text{pH} = 1,5$.

35.6 1/ $n_{\text{OH}^-} = 10^{-5} \text{ mol}$. 2/ $4 \cdot 10^{-4} \text{ g}$.

35.8 2 cm^3 ; 10 cm^3 ; 50 cm^3 .

35.10 0,46 mol.l^{-1} .

35.14 $C_A = 5,7 \cdot 10^{-3} \text{ mol.l}^{-1}$; $m = 4,84 \text{ mg}$.

35.15 1/ $C_B = 10,6 \text{ mol.l}^{-1}$. 2/ 4 gouttes env.

35.16 1/ $\rho = 1,18 \text{ g.cm}^{-3}$. 3/ Le BB passe du jaune au bleu; $C_A = 0,114 \text{ mol.l}^{-1}$.

36.2 3/ $[\text{K}^+] = [\text{OH}^-] = 10^{-3} \text{ mol.l}^{-1}$; $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-11} \text{ mol.l}^{-1}$.

4/ $(\text{H}_3\text{O}^+, \text{Cl}^-) + (\text{K}^+, \text{OH}^-) \rightarrow (\text{K}^+, \text{Cl}^-) + 2\text{H}_2\text{O}$; réaction exothermique.

36.4 2/ 69,93 g.

36.6 2/ $\text{pH} \approx 11,7$. 3/ $\text{pH} \approx 8,7$.

36.7 2/ $C_2 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ mol.l}^{-1}$; $\text{pH}_2 \approx 11,2$.

36.10 1/ $\text{pH} = 3$, hélianthine rouge. 2/ $\text{pH} = 4$, hélianthine rose.

37.1 Solution de sulfate de fer III.

37.3 2/ 7,94 g. 3/ 16,7 cm^3 . 4/ 1 l de NO et 1 l de NO_2 .

37.5 0,35 g.

37.7 1/ $[\text{K}^+] = [\text{OH}^-] = 0,1 \text{ mol.l}^{-1}$. 2/ $V_1 = 75 \text{ cm}^3$. 3/ $V_2 = 150 \text{ cm}^3$.

37.8 Solution de carbonate d'aluminium.

37.9 Sulfure de fer II.

**collection
EURIN-GIÉ**

Sciences physiques
seconde

Sciences physiques
premières A et B

Physique
premières S et E

Chimie
premières S et E

Physique
terminale D

Chimie
terminales C et E

Chimie
terminale D

**collection
LIAISONS
SCIENTIFIQUES**

A. Guinier
La structure de la matière

L. Gouguenheim
Méthodes de l'astrophysique

R. Daudel
Vision moléculaire du monde

M. Françon
L'optique moderne
et ses développements

A. Guinier
La matière à l'état solide

SPECIMEN
DE DOCUMENTATION
réservé à l'établissement

13/4662/6

Imprimé en France / SAGIM - Liry-Gargan

**COMMERCIALISATION
INTERDITE**

HACHETTE

79, bd Saint-Germain
75285 Paris Cedex 06

Classiques

175E0123 75106 2141

POUR FAIRE

Marché 75 200

17 PARIS 28 bis

MME EL KHESSASSI A MARI
PROFESSEUR
COLLEGE ET LYCEE PRIVES
ADELINE DESIR
50 RUE DE RENNES
75006 PARIS

879095