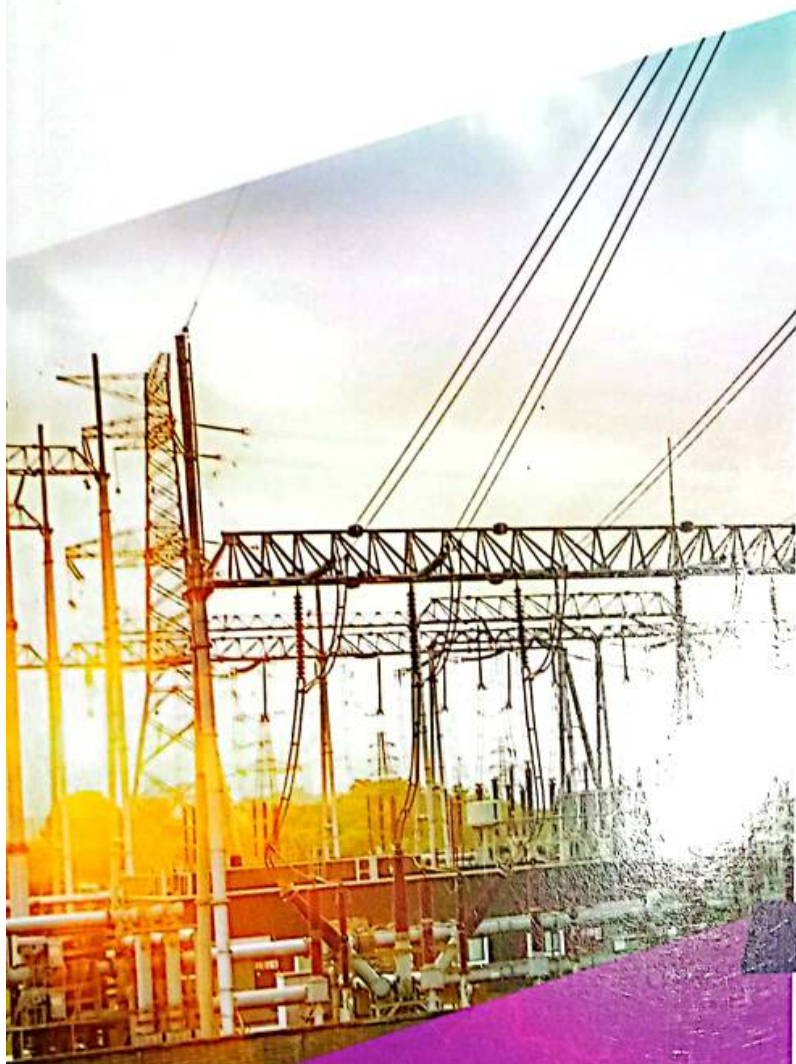


La Physique

Collection "SUPERNOVA"



4 000 FCFA

en
le
D

Editions
SuperNova

Collection "SUPERNOVA"

LA PHYSIQUE EN T^{le} D

CHERIF
KARAMO KO

Sous la supervision de
M. ABO LORNG DANIEL
Inspecteur de l'Enseignement Secondaire


Éditions
SuperNova

11
Nous adressons nos remerciements à tous les enseignants qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce manuel.

Toute représentation, traduction, adaptation ou reproduction, même partielle, par tous procédés, en tous pays, faite sans autorisation préalable est illicite et exposerait le concerné à des poursuites judiciaires.

Ref: loi du 11 mai 1957, alinéas 2 et 3 de l'article 41.

Une représentation ou reproduction sans autorisation de l'éditeur ou des auteurs constituerait une contrefaçon par les articles 425 et suivant du Code pénal.

MAQUETTE & MISE EN PAGE :

SERVICE INFOGRAPHIE DES ÉDITIONS SUPERNOVA

N'DRI N'GUESSAN ALEXANDRE

© Éditions SUPERNOVA 2023

ISBN : 978-2-37967-044-2

Dépot légal n°19436 du 1^{er} Trimestre 2023 (Côte d'Ivoire)



www.editionssupernova.com
E-mail : info@editionssupernova.com
Contact : +225 057 457 9999

AVANT-PROPOS

Cet ouvrage de Physique du niveau de la terminale de la collection « SUPERNOVA » a pour titre « La Physique en terminale D ». C'est un manuel, fruit d'un travail collectif d'Inspecteurs Généraux de l'Éducation Nationale, d'Inspecteurs de l'Enseignement Secondaire, d'Encadreurs pédagogiques et de Professeurs chevronnés.

Conforme à la nouvelle approche pédagogique (APC) en vigueur actuellement en Côte d'Ivoire et à ses objectifs, il entend mettre l'élève au centre du processus d'apprentissage et d'évaluation.

L'ouvrage est constitué de quinze (15) leçons réparties en quatre thèmes et structurées chacune autour de neuf (9) rubriques :

- **Tableau des habiletés et contenus** : c'est une rubrique qui présente les habiletés à évaluer dans la leçon.
- **Notions essentielles** : il s'agit des notions essentielles à retenir dans la leçon.
- **Situation d'apprentissage** : la situation d'apprentissage donne du sens à la leçon en permettant de fixer le cadre des apprentissages, de planifier et d'organiser les activités d'apprentissage.
- **Activités** : il s'agit d'activités que l'élève est amené à réaliser, ou d'activités dont l'élève est amené à suivre la réalisation afin d'aboutir aux notions essentielles ci-dessus mentionnées. Chaque activité se termine par un bilan ou un point suivi d'une activité d'application.
- **Résumé de cours** : c'est un bref résumé de l'essentiel à retenir.
- **Méthodes** : ici sont regroupées quelques méthodes de résolution d'exercices (procédés), ou des savoir-faire et savoir être au niveau des manipulations.
- **Exercices résolus** : il s'agit d'exercices d'application portant sur les habiletés de la leçon, exercices corrigés et commentés.
- **Je m'exerce** : cette rubrique regroupe des exercices d'application ou de fixation, des exercices de renforcement ou d'approfondissement et des situations d'évaluation.
- **Rendez-vous du curieux** : il s'agit de textes, d'images en relation étroite avec la leçon et donnant des informations au-delà des contenus traités.

Les auteurs de ce manuel accueilleront avec bienveillance les observations et suggestions que chacun voudra leur faire afin de l'améliorer.

Les Auteurs

PRÉSENTATION DU LIVRE

ADAPTATION D'UN GÉNÉRATEUR À UN RÉCEPTEUR

LEÇON 1

TABLEAU DES HABILETÉS ET DES CONTENUS

HABILETÉS	CONTENUS
1. Comprendre le rôle du générateur et du récepteur.	1.1. Définitions et symboles.
2. Analyser un circuit électrique.	2.1. Schéma d'un circuit électrique.
3. Concevoir un circuit électrique.	3.1. Schéma d'un circuit électrique.
4. Réaliser un circuit électrique.	4.1. Schéma d'un circuit électrique.
5. Vérifier le fonctionnement d'un circuit électrique.	5.1. Schéma d'un circuit électrique.

NOTIONS ESSENTIELLES

- 1. Définitions et symboles.
- 2. Schéma d'un circuit électrique.
- 3. Schéma d'un circuit électrique.
- 4. Schéma d'un circuit électrique.
- 5. Schéma d'un circuit électrique.

SITUATION D'APPRENTISSAGE



Tableau des habiletés et des contenus

C'est une rubrique qui présente les habiletés de la leçon à évaluer.

Notions essentielles
Il s'agit des notions essentielles à retenir pour la leçon.

Situation d'apprentissage
Cette situation d'apprentissage introduit la leçon et lui donne un sens.

Activités

Il s'agit d'un ensemble d'activités que l'élève est amené soit à réaliser, soit à suivre la réalisation afin d'aboutir aux notions essentielles ci-dessus mentionnées. Chaque activité se termine par un bilan ou un point suivi d'une activité d'application.

Résumé du cours

C'est un bref résumé de l'essentiel à retenir.

Je m'exerce

Cette rubrique regroupe des exercices d'application ou de fixation, des exercices de renforcement ou d'approfondissement et des situations d'évaluation.

RENDEZ-VOUS DES CURIEUX

Rendez-vous du curieux
Il s'agit de textes, d'images en relation étroite avec la leçon et donnant des informations au-delà des contenus traités.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS

THÈME 1 : MÉCANIQUE

LEÇON 1 : CINÉMATIQUE DU POINT	7
LEÇON 2 : MOUVEMENT DU CENTRE D'INERTIE D'UN SOLIDE	23
LEÇON 3 : MOUVEMENTS DANS LES CHAMPS $\vec{g}$ ET $\vec{E}$ UNIFORMES	37
LEÇON 4 : OSCILLATIONS MÉCANIQUES LIBRES	53

THÈME 2 : ÉLECTROMAGNÉTISME

LEÇON 5 : CHAMP MAGNÉTIQUE	67
LEÇON 6 : MOUVEMENT D'UNE PARTICULE CHARGÉE DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE UNIFORME	81
LEÇON 7 : LOI DE LAPLACE	101
LEÇON 8 : AUTO-INDUCTION	115

THÈME 3 : ÉLECTRICITÉ

LEÇON 9 : MONTAGES DÉRIVATEUR ET INTÉGRATEUR	129
LEÇON 10 : OSCILLATIONS ÉLECTRIQUES LIBRES DANS UN CIRCUIT LC	147
LEÇON 11 : CIRCUIT RLC EN RÉGIME SINUSOÏDAL FORCÉ	165
LEÇON 12 : RÉSONANCE D'INTENSITÉ D'UN CIRCUIT RLC SÉRIE	183
LEÇON 13 : PUISSANCE EN COURANT ALTERNATIF	199

THÈME 4 : PHYSIQUE NUCLÉAIRE

LEÇON 14 : RÉACTIONS NUCLÉAIRES SPONTANÉES	211
LEÇON 15 : RÉACTIONS NUCLÉAIRES PROVOQUÉES	223

LEÇON

1

CINÉMATIQUE DU POINT

TABLEAU DES HABILETÉS ET DES CONTENUS

HABILETÉS	CONTENUS
Connaître	les expressions : - du vecteur position ; - du vecteur vitesse d'un point dans un repère donné ; - du vecteur accélération d'un point dans un repère donné ; - de l'accélération normale ; - de l'accélération tangentielle.
Déterminer	les équations horaires des mouvements : - rectiligne et uniforme ; - circulaire et uniforme ; - rectiligne et uniformément varié.
Utiliser	• les équations horaires $x(t)$; $v_x(t)$; $\theta(t)$ des différents mouvements. • les relations $\Delta v_x^2 = 2a\Delta x$; $v = R\omega$; $s = R\theta$; $a_N = \frac{v^2}{R}$.
Exploiter	un enregistrement.

NOTIONS ESSENTIELLES

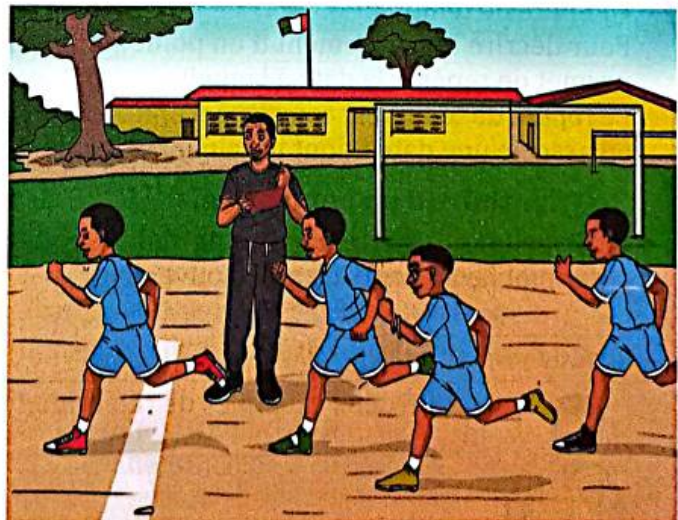
- Référentiel
- Trajectoire
- Vecteur position
- Vecteur vitesse
- Vecteur accélération
- Accélération tangentielle
- Accélération normale
- Équations horaires
- Mouvement rectiligne et uniforme
- Mouvement rectiligne et uniformément varié
- Mouvement circulaire et uniforme

SITUATION D'APPRENTISSAGE

Au cours d'une séance d'Épreuve Physique et Sportive organisée dans le cadre des Examens Blancs Régionaux, tu découvres que ton chef de classe a des performances extraordinaires.

En effet, en dépit du retard qu'il accuse à chaque essai pour se lancer dans la course alors que vous avez la même position au départ, il arrive à accélérer et à vous dépasser pour être le premier sur la ligne de fond.

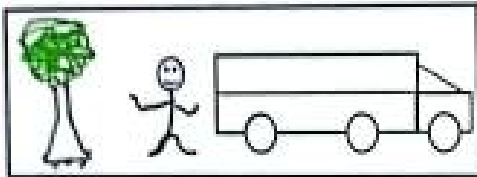
Émerveillée par sa rapidité, votre classe décide, sous la conduite de votre professeur de Physique-Chimie, de connaître le vecteur-position, le vecteur-vitesse et le vecteur-accélération de votre chef de classe considéré comme un point mobile, puis d'établir les équations horaires de quelques types mouvements.



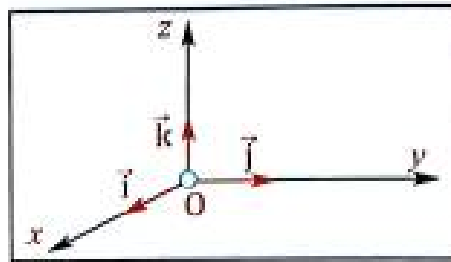
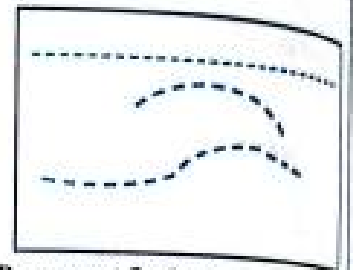
I- ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1 : REPÉRER UN POINT MOBILE

- 1- Qu'observes-tu sur les documents (1) et (2) ?
- 2- Tu veux décrire le mouvement du véhicule. Cite l'autre objet qui peut servir de référence.
- 3- Le document (3) donne différents types de trajectoire. Nomme-les.
- 4- Dis ce que constitue l'ensemble des trois axes (Ox , Oy , Oz) du document 2.



Document 1 : Mouvement et référentiel

Document 2 : Repère d'espace (O, x, y, z)

Document 3 : Quelques trajectoires

Je fais le point de l'activité

1- Notion de référentiel

L'étude du mouvement d'un point mobile nécessite le choix d'un objet de référence du fait de la relativité du mouvement.

On appelle référentiel, tout objet choisi comme référence par rapport auquel on décrit le mouvement d'un point mobile. Il existe des référentiels dits galiléens dans lesquels nous étudierons les mouvements.

2- Repère d'espace et repère de temps

• Repère d'espace

Pour repérer la position d'un mobile, on choisit un repère d'espace. Le repère d'espace est défini par une origine qui est fixe dans le référentiel et des axes munis de vecteurs unitaires.

- Le référentiel terrestre est centré sur le centre de masse de la Terre. Les axes d'un repère lié à ce référentiel sont trois axes (x, y, z) fixes liés à la Terre.
- Le référentiel géocentrique est centré sur le centre de masse de la Terre. Les axes d'un repère lié à ce référentiel sont trois axes dirigés vers trois étoiles lointaines qui apparaissent fixes.
- Le référentiel héliocentrique est centré sur le centre de masse du Soleil. Les axes d'un repère lié à ce référentiel sont trois axes dirigés vers trois étoiles lointaines qui apparaissent fixes.

• Repère de temps

Pour décrire le mouvement d'un point mobile, on se sert d'une horloge ou d'un chronomètre qui permet de repérer la date à laquelle le point mobile occupe une position donnée.

Le repère de temps est constitué d'une origine des dates, fixée par l'observateur. À chaque instant on associe une date t dont la valeur correspond à la durée écoulée depuis l'instant initial.

3- Trajectoire d'un point mobile

On appelle trajectoire d'un point mobile, l'ensemble des positions successives occupées par le point mobile au cours de son mouvement.

J'évalue mes acquis

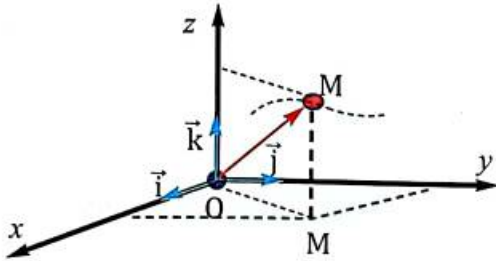


Cite deux exemples de référentiels.

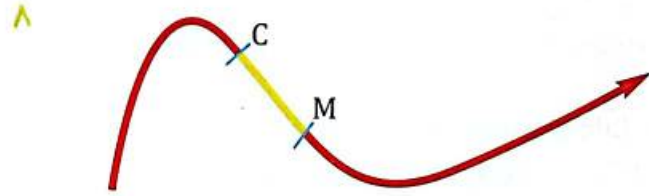
ACTIVITÉ 2 : CONNAÎTRE L'EXPRESSION DU VECTEUR-POSITION ET L'ABSCISSE CURVILIGNE

Observe les documents 4 et 5.

- 1- Nomme le vecteur $\vec{OM}$ du document 4.
- 2- Donne l'expression de $\vec{OM}$ en fonction de ses composantes.
- 3- Dis ce que la longueur $\widehat{CM}$ représente sur le document 5.



Document 4 : Mobile en mouvement dans l'espace



Document 5 : Trajectoire curviligne

Je fais le point de l'activité**1- Vecteur-position dans un repère cartésien**

Le vecteur $\vec{OM}$ (en rouge) du document 4 est appelé vecteur-position du point mobile M. Dans le repère cartésien $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$, le vecteur position a pour expression : $\vec{OM} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$. x, y et z sont les coordonnées cartésiennes du point M à la date t . $x\vec{i}, y\vec{j}$ et $z\vec{k}$ sont les composantes du vecteur-vitesse $\vec{OM}$. Ce sont des fonctions du temps. Ces fonctions $x = f(t), y = g(t)$ et $z = h(t)$ sont aussi appelées les équations horaires du mouvement du mobile.

2- Abscisse curviligne

Pour des trajectoires curvilignes comme celle du document 5, on oriente arbitrairement la trajectoire. On choisit une origine des espaces.

La longueur de l'arc $\widehat{CM}$ définit l'abscisse curviligne du point mobile. On la note s .

Si le point mobile est en mouvement, s est une fonction du temps.

J'évalue mes acquis

Le vecteur position d'un mobile dans l'espace muni du repère $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ est donné par $\vec{OM} = (4t^2 + 3)\vec{i} + (2t - 1)\vec{j} + 3\vec{k}$.

Écris les équations horaires du mouvement du mobile.

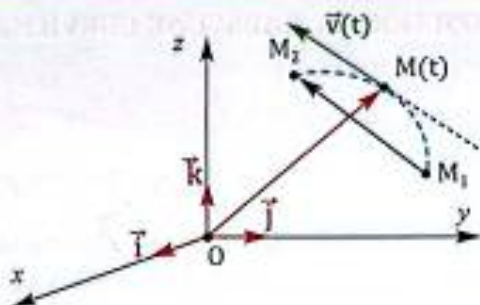
ACTIVITÉ 3 : ÉCRIRE L'EXPRESSION DU VECTEUR VITESSE

- 1- Observe le document 6.

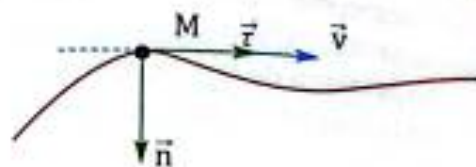
Le point mobile M occupe deux positions successives M_1 et M_2 ; M_1 à l'instant t_1 et M_2 à l'instant t_2 .

- 1.1- Donne l'expression du vecteur vitesse moyenne du mobile entre les instants t_1 et t_2 .
- 1.2- Donne l'expression du vecteur vitesse instantanée à partir du vecteur vitesse moyenne, pour une durée très brève de passage de M_1 à M_2 .

- 2- Sur le document 7, le vecteur vitesse est porté par la tangente au point M. Donne l'expression de la vitesse linéaire dans le cas d'une telle trajectoire curviligne.



Document 6 : Vecteurs vitesses moyenne et instantanée



Document 7 : Repère de Frenet

Je fais le point de l'activité

1- Le vecteur-vitesse moyenne

Le vecteur vitesse moyenne entre les positions M_1 et M_2 pendant la durée $t_2 - t_1$ est donné

par l'expression : $\vec{v}_m = \frac{\vec{M_1M_2}}{t_2 - t_1} = \frac{\vec{OM_2} - \vec{OM_1}}{t_2 - t_1}$

2- Le vecteur-vitesse instantanée

- On pose $\Delta t = t_2 - t_1$. Lorsque Δt tend vers zéro, la position M_2 tend vers la position M_1 . La vitesse moyenne tend vers une limite appelée vitesse instantanée $\vec{v}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\vec{OM_2} - \vec{OM_1}}{t_2 - t_1}$

Cela peut se traduire par l'écriture : $\vec{v}(t) = \frac{d\vec{OM}}{dt}$.

- Par définition, le vecteur vitesse instantanée d'un point mobile est égal à la dérivée par rapport au temps de son vecteur position.

3- Expression du vecteur-vitesse instantanée en coordonnées cartésiennes

- En coordonnées cartésiennes, l'expression du vecteur vitesse instantanée d'un point mobile dans le repère d'espace $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ est : $\vec{v}(t) = \frac{dx}{dt}\vec{i} + \frac{dy}{dt}\vec{j} + \frac{dz}{dt}\vec{k}$.
Car $\vec{i}, \vec{j}$ et $\vec{k}$ sont des vecteurs constants.
 $\frac{d\vec{i}}{dt} = \frac{d\vec{j}}{dt} = \frac{d\vec{k}}{dt} = \vec{0}$

On écrit aussi $\vec{v}(t) = \dot{x}\vec{i} + \dot{y}\vec{j} + \dot{z}\vec{k}$ avec $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$; $\dot{y} = \frac{dy}{dt}$; $\dot{z} = \frac{dz}{dt}$.

- La valeur de la vitesse (ou la norme du vecteur vitesse) est donnée par l'expression :
 $v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}$

4- Expression de la vitesse linéaire dans le cas d'une trajectoire curviligne

On se sert du repère de Frenet $(M, \vec{\tau}, \vec{n})$ (voir document 7).

La vitesse linéaire du mobile est égale à la dérivée par rapport au temps de l'abscisse curviligne d'où $\vec{v}(t) = \frac{ds}{dt}\vec{\tau}$.

- $\vec{\tau}$ est le vecteur unitaire de la tangente à la trajectoire au point M ; il est orienté dans le sens du mouvement.
- $\vec{n}$ est le vecteur unitaire de la normale à la tangente.

J'évalue mes acquis



Les équations horaires du mouvement d'un point mobile sont :

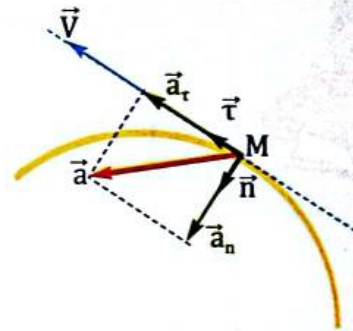
$$\vec{OM} \begin{cases} x(t) = t^2 \\ y(t) = -4t \\ z(t) = 0 \end{cases}$$

- 1- Donne l'expression du vecteur-vitesse du point mobile dans le repère $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$.
- 2- Détermine la valeur de la vitesse du point mobile à la date $t = 2,5$ s.

ACTIVITÉ 4 : DÉFINIR ET EXPRIMER LE VECTEUR ACCÉLÉRATION

Considère le même mouvement du point mobile M.

- 1- Définis le vecteur accélération moyenne du point M entre les instants t_1 et t_2 .
- 2- Définis le vecteur accélération instantanée du point M.
- 3- Donne son expression dans un repère d'espace cartésien.
- 4- Exprime le vecteur accélération dans un repère de Frenet (document 8).
- 5- Dis ce que représentent les vecteurs notés $\vec{a}_t$ et $\vec{a}_n$.



Document 8 : Vecteur-accélération dans la base de Frenet

Je fais le point de l'activité

1- Vecteur accélération moyenne

On dit qu'un mouvement est accéléré ou retardé parce que sa vitesse croît ou décroît.

Ainsi, le vecteur-accélération exprime la variation du vecteur-vitesse par rapport au temps, tout comme le vecteur-vitesse exprime la variation du vecteur-position par rapport au temps.

Soit $\vec{v}_1$ le vecteur-vitesse du point mobile à la date t_1 et $\vec{v}_2$ son vecteur-vitesse à la date t_2 .

Le vecteur accélération moyenne du point mobile entre t_1 et t_2 est égal à la variation de son vecteur vitesse par rapport au temps entre t_1 et t_2 .

Il a pour expression :
$$\vec{a}_m = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}.$$

2- Vecteur accélération instantanée

- Le vecteur-accélération instantanée d'un point mobile est égal à la dérivée par rapport au temps de son vecteur-vitesse : $\vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}}{dt}.$
- Le vecteur-accélération instantanée d'un point mobile est aussi égal à la dérivée seconde par rapport au temps du vecteur position : $\vec{a}(t) = \frac{d^2 \vec{OM}}{dt^2}.$

3- Expression du vecteur accélération dans un repère cartésien

En coordonnées cartésiennes :

$$\vec{a}(t) = \ddot{x}\vec{i} + \ddot{y}\vec{j} + \ddot{z}\vec{k} \text{ ou } \vec{a}(t) = \frac{d^2x}{dt^2}\vec{i} + \frac{d^2y}{dt^2}\vec{j} + \frac{d^2z}{dt^2}\vec{k}.$$

N.B. L'accélération s'exprime, dans le Système International en m/s^2 ou $m.s^{-2}$.

4- Expression du vecteur accélération dans un repère de Frenet : accélération normale et accélération tangentielle

Le repère $(M, \vec{t}, \vec{n})$ lié au point M est appelé repère de Frenet. Il est utile pour les trajectoires curvilignes.

Dans le repère de Frenet, le vecteur-accélération $\vec{a}$ pour expression : $\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_n.$

- $\vec{a}_t$ est le vecteur-accélération tangentielle ;
- $\vec{a}_n$ est le vecteur-accélération normale.

$$\vec{a} = \frac{dv}{dt} \vec{t} + \frac{v^2}{\rho} \vec{n}; \rho \text{ est le rayon de courbure de la trajectoire curviligne.}$$

$$\vec{a}_t = \frac{dv}{dt} \vec{t} \text{ et } \vec{a}_n = \frac{v^2}{\rho} \vec{n}.$$

Pour un mouvement circulaire, on a : $\vec{a} = \frac{dv}{dt} \vec{t} + \frac{v^2}{R} \vec{n}$ (R est le rayon de la trajectoire).

J'évalue mes acquis



Les composantes du vecteur-position d'un point mobile M, dans le plan (OX, OY) sont telles que :

$$\vec{OM} \begin{cases} x = 2t \\ y = -5t^2 + 4t \end{cases}$$

- 1- Détermine les composantes :
 - 1.1- du vecteur vitesse ;
 - 1.2- du vecteur accélération.
- 2- Établis l'équation cartésienne de la trajectoire du mobile et précise sa nature.

ACTIVITÉ 5 : ÉTUDIER QUELQUES TYPES DE MOUVEMENT

Les documents 9 a, 9 b et 10 ci-dessous présentent, chacun, les positions d'un point mobile repérées des instants t_i par intervalles de temps égaux.

$$\Delta t = t_1 - t_0 = t_2 - t_1 = t_3 - t_2 \dots$$

$\Delta t = 10 \text{ ms}$. Les figures sont données à l'échelle 1.

1- Document 9 a.

- 1.1- Donne la nature de la trajectoire du point mobile M.
- 1.2- Compare les distances parcourues par le point mobile pendant des durées égales Δt .
- 1.3- Représente les vecteurs vitesses du point mobile aux instants t_1 , t_3 et t_5 dans les positions respectives M_1 , M_3 et M_5 puis compare-les.

Échelle : $1 \text{ cm} \rightarrow 10 \text{ m.s}^{-1}$.

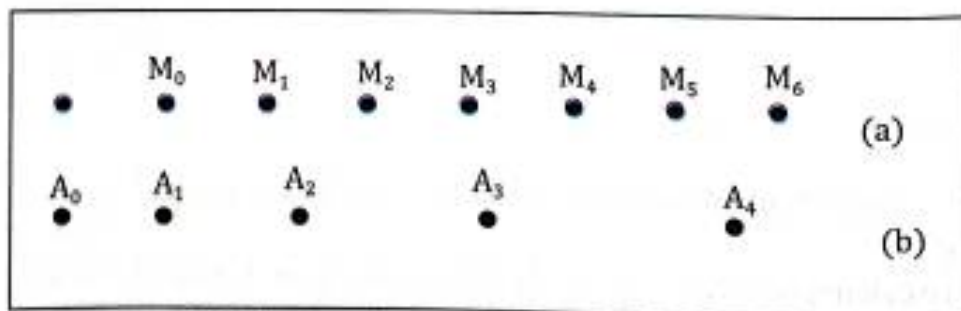
- 1.4- Définis un mouvement rectiligne et uniforme.
- 1.5- Établis ses équations horaires.

2- Document 9 b.

- 2.1- Donne la nature de la trajectoire du point mobile A.
- 2.2- Compare les distances parcourues par le point mobile pendant des durées égales Δt .
- 2.3- Représente les vecteurs vitesses du point mobile aux instants t_1 , t_2 , t_3 et t_4 dans les positions respectives A_1 , A_2 , A_3 et A_4 .

Échelle : $1 \text{ cm} \rightarrow 10 \text{ m.s}^{-1}$.

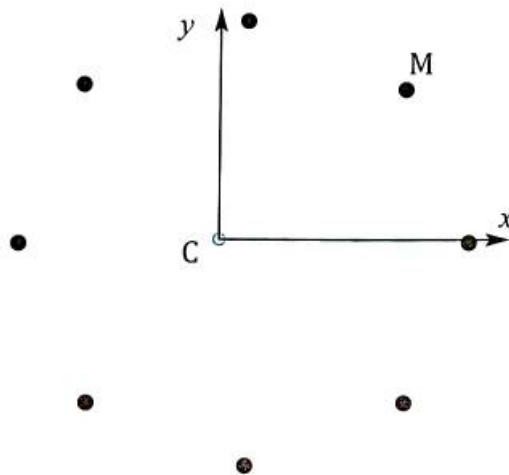
- 2.4- Compare les variations $\Delta \vec{v}$ de ces vecteurs vitesses puis les variations $\frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$.
- 2.5- Définis un mouvement rectiligne et uniformément varié.
- 2.6- Établis ses équations horaires.
- 2.7- Dis dans quelles conditions le mouvement est accéléré ou retardé.



Document 9. Trajectoires de mouvements rectilignes

3- Document 10.

- 3.1- Précise la nature de la trajectoire du point mobile.
- 3.2- Indique ce qui varie au niveau du vecteur-vitesse au cours du temps.
- 3.3- Définis un mouvement circulaire et uniforme.
- 3.4- Donne la relation entre l'abscisse curviligne, le rayon et l'abscisse angulaire.
- 3.5- Ecris son équation horaire.
- 3.6- Exprime le vecteur accélération d'un tel mouvement dans un repère de Frenet.
- 3.7- Définis la période T du mouvement du mobile.



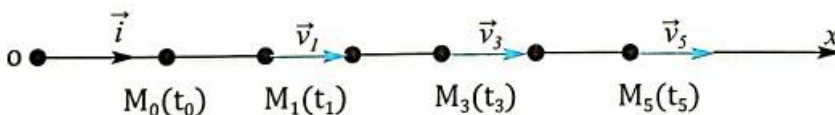
Document 10. Trajectoire circulaire

Je fais le point de l'activité

1- Document 9 a.

• Exploitation du document

- La trajectoire du point mobile est une droite.
- Les distances parcourues sont égales pendant les mêmes durées Δt .



Remarque: l'origine O du repère ne coïncide pas nécessairement avec la position M_0 du mobile à la date t_0 .

- À la date t_1 , la vitesse est $v_1 = \frac{M_0M_2}{t_2-t_0} = \frac{M_0M_2}{2\Delta t} = \frac{2,5 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-3}} = 12,5 \text{ m.s}^{-1}$.

Les distances parcourues étant égales pendant les durées Δt , $v_1 = v_2 = v_3 = v_4 = v_5$ aux autres dates.

Par conséquent, les vecteurs vitesses du point mobile sont égaux à chaque instant.

Toutes ces caractéristiques indiquent que le mouvement est rectiligne et uniforme.

• Définition du mouvement rectiligne et uniforme

Le mouvement d'un point mobile est rectiligne et uniforme si :

- sa trajectoire est une droite ;
- sa vitesse est constante.

• Équation horaire du mouvement rectiligne et uniforme

A une date t quelconque, $\vec{OM} = x\vec{i}$.

$$\vec{v} = \frac{d\vec{OM}}{dt} = \frac{dx}{dt}\vec{i} \text{ donc } v_x = \frac{dx}{dt}, \text{ d'où } x = v_{0x}t + x_0.$$

L'équation horaire d'un mouvement rectiligne et uniforme est de la forme :

- $x = v_{0x}t + x_0$;
- v_{0x} est la vitesse du mobile suivant l'axe $(O, \vec{i})$;
- x_0 est la valeur de l'abscisse du mobile à l'instant initial t_0 .

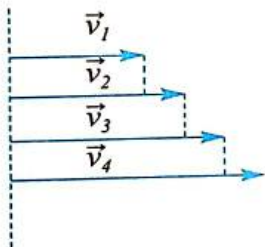
2- Document 9 b

• Exploitation du document

La trajectoire du point mobile est une droite, mais les distances parcourues pendant les mêmes durées Δt ne sont pas égales.

Les vecteurs vitesses aux dates t_1, t_2, t_3 et t_4 :

- à la date t_1 , la vitesse est $v_1 = \frac{A_0A_2}{t_2-t_0} = \frac{A_0A_2}{2\Delta t} = \frac{3,1 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-3}} = 15,5 \text{ m.s}^{-1}$;
- à la date t_2 , la vitesse est $v_2 = \frac{A_1A_3}{t_3-t_1} = \frac{A_1A_3}{2\Delta t} = \frac{4,1 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-3}} = 20,5 \text{ m.s}^{-1}$;
- à la date t_3 , la vitesse est $v_3 = \frac{A_2A_4}{t_4-t_2} = \frac{A_2A_4}{2\Delta t} = \frac{5,1 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-3}} = 25,5 \text{ m.s}^{-1}$;
- à la date t_4 , la vitesse est $v_4 = \frac{A_3A_5}{t_5-t_3} = \frac{A_3A_5}{2\Delta t} = \frac{6,1 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-3}} = 30,5 \text{ m.s}^{-1}$.



$\vec{v}_2 - \vec{v}_1 = \vec{v}_3 - \vec{v}_2 = \vec{v}_4 - \vec{v}_3 = \Delta\vec{v}$; les variations des vecteurs vitesses sont égales. Ce qui implique que $\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$ est constant.

Pour un instant t , on alors $\frac{d\vec{v}}{dt}$ est constant.

Or $\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{a}$, le vecteur accélération à chaque instant est constant. On peut aussi dire que la variation du vecteur vitesse se fait de façon uniforme.

• Définition du mouvement rectiligne et uniformément varié

Un point mobile a un mouvement rectiligne et uniformément varié si :

- sa trajectoire est rectiligne ;
- la valeur algébrique de son accélération reste constante.

• Équation horaire du mouvement rectiligne et uniformément varié

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{a}, \text{ d'où } v_x = a_x t + v_{0x} \text{ suivant l'axe } (O, \vec{i}).$$

$$\frac{d\vec{OM}}{dt} = \vec{v}, \text{ d'où } x(t) = \frac{1}{2}a_x t^2 + v_{0x}t + x_0$$

En résumé, les équations horaires d'un mouvement rectiligne et uniformément varié sont :

$$x(t) = \frac{1}{2}a_x t^2 + v_{0x}t + x_0 \quad (1) : \text{équation horaire de la position ;}$$

$$v_x = a_x t + v_{0x} \quad (2) : \text{équation horaire de la vitesse.}$$

En combinant les deux expressions (1) et (2), on obtient la relation : $v_x^2 - v_{0x}^2 = 2a_x(x - x_0)$.
Ce qui peut se mettre sous la forme : $\Delta v_x^2 = 2a_x \Delta x$.

- **Mouvement rectiligne et uniformément accéléré ou retardé**
 - Si $\vec{a} \cdot \vec{v} > 0$, le mouvement est rectiligne et uniformément accéléré.
 - Si $\vec{a} \cdot \vec{v} < 0$, le mouvement est rectiligne et uniformément retardé (ou décéléré).

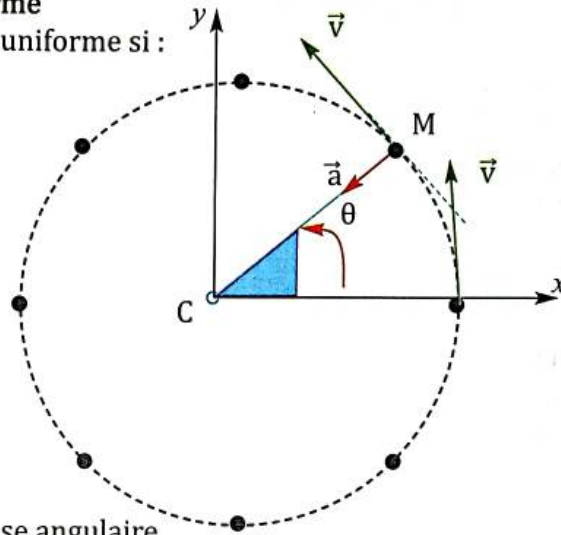
3- Document 10

- La trajectoire du point mobile est un cercle.
- La valeur du vecteur vitesse est constante, mais sa direction varie.

• Définition du mouvement circulaire et uniforme

Un point mobile a un mouvement circulaire et uniforme si :

- sa trajectoire est un cercle ;
- la valeur de sa vitesse est constante.



• Expression de la vitesse linéaire et de la vitesse angulaire

$$v = \frac{ds}{dt} = R \frac{d\theta}{dt} \quad (\theta \text{ est appelé abscisse angulaire}).$$

$$v = R\omega \quad (\omega \text{ désigne la vitesse angulaire du mobile}).$$

• Équation horaire $\theta = f(t)$ à partir de l'abscisse angulaire

$$\theta(t) = \omega t + \theta_0$$

• Expression du vecteur accélération dans la base de Frenet

La composante tangentielle du vecteur accélération est telle que : $a_t = \frac{dv}{dt} = 0$

$$\text{d'où } \vec{a} = \vec{a}_n = \frac{v^2}{R} \vec{n} = R\omega^2 \vec{n}.$$

N.B : Le vecteur accélération est centripète (porté par le rayon CM et dirigé vers le centre du cercle).

• Période et fréquence du mouvement

- La période du mouvement : c'est le temps mis par le point mobile pour faire un tour complet suivant la trajectoire circulaire ; on la note T.

À la date t, le mobile est au point M : $\theta(t) = \omega t + \theta_0$.

À la date t + T, le mobile revient au point M. Ainsi : $\theta + 2\pi = \omega(t + T) + \theta_0$.

$$\theta + 2\pi = \omega t + \omega T + \theta_0. \text{ Comme } \theta(t) = \omega t + \theta_0 \text{ alors, } \omega T = 2\pi \text{ donc } T = \frac{2\pi}{\omega}$$

$$T = \frac{2\pi R}{V} = \frac{2\pi}{\omega}$$

- La fréquence caractérise le nombre de tours effectués par le mobile en une seconde.

$$\text{On la note N ou f. } f = \frac{1}{T} \quad (f \text{ en hertz (Hz)}).$$

J'évalue mes acquis



Un mobile se déplace sur une voie rectiligne et horizontale. Le tableau ci-dessous donne les positions et les vitesses pour deux dates différentes.

Dates	Abscisses	vitesse
$t = 0 \text{ s}$	$x_0 = -1 \text{ m}$	$V_0 = 1 \text{ m/s}$
t_2	$x_2 = 3 \text{ m}$	$V_2 = 5 \text{ m/s}$

- 1- Détermine l'accélération a supposée constante du point mobile.
- 2- Établis l'équation horaire du mouvement du point mobile.
- 3- Détermine la date t_2 .

II- RÉSUMÉ DE COURS

- Un référentiel est un objet par rapport auquel on décrit un mouvement.
- En coordonnées cartésiennes, dans le repère d'espace $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$, le vecteur-position du mobile a pour expression : $\vec{OM} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$.
- En coordonnées cartésiennes, dans le repère d'espace $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$, le vecteur-vitesse du mobile a pour expression : $\vec{v} = \dot{x}\vec{i} + \dot{y}\vec{j} + \dot{z}\vec{k}$.
- Le vecteur-accélération instantanée est la dérivée par rapport au temps du vecteur-vitesse instantanée : $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$.

- L'équation horaire d'un mouvement rectiligne et uniforme est : $x(t) = v_0 t + x_0$.

L'équation horaire de la position d'un mouvement rectiligne et uniformément varié est :

$$x(t) = \frac{1}{2} a_s t^2 + v_0 t + x_0$$

- Dans un mouvement circulaire et uniforme, le vecteur-accélération est centripète et a pour expression :

$$\vec{a} = \vec{a}_c = \frac{v^2}{R_n} \vec{n}.$$

III- MÉTHODES

- Pour déterminer les coordonnées cartésiennes du vecteur-vitesse, il faut dériver les coordonnées du vecteur position.
- Pour déterminer les coordonnées cartésiennes du vecteur-accélération, il faut dériver les coordonnées du vecteur vitesse.
- Dans le cas d'une trajectoire curviligne, il faut recourir à la base de Frenet.
- Pour établir l'équation horaire d'un mouvement rectiligne, il faut connaître :
 - la nature du mouvement (uniforme ou uniformément varié) ;
 - l'origine du repère d'espace et l'origine du repère de temps. En effet, la position M_0 d'un point à la date t_0 ne coïncide pas nécessairement avec l'origine O du repère d'espace.

Exemple :



- Dans un mouvement circulaire et uniforme, la composante tangentielle $\vec{a}_t$ du vecteur accélération est toujours égale au vecteur nul. Par conséquent, on écrira toujours $\vec{a} = \vec{a}_c = \frac{v^2}{R_n} \vec{n}$ pour ce type de mouvement.

IV- EXERCICES RÉSOLUS

Exercice 1

Un point mobile se déplace dans le plan (Ox, Oy) . On donne l'expression du vecteur position du mobile : $\vec{OM} = (2t - 1)\vec{i} + (4 - 5t)\vec{j}$; $t > 0$ s.

- 1- Donne les composantes V_x et V_y du vecteur-vitesse instantanée.
- 2- Détermine la valeur de la vitesse du mobile.
- 3- Établis l'équation cartésienne de la trajectoire du mobile et précise sa nature.

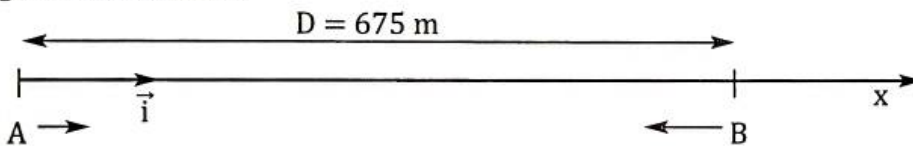
Exercice 2

L'équation horaire du mouvement d'un mobile se déplaçant sur une voie rectiligne et horizontale est donnée par l'expression suivante : $x(t) = 2t^2 - 1$; x en mètre et t en seconde.

- 1- Donne la valeur de la vitesse initiale du mobile.
- 2- Donne la valeur de l'accélération constante a_x du mobile.
- 3- Détermine la distance d parcourue par le mobile entre les instants $t_1 = 1,5$ s et $t_2 = 2$ s.

Exercice 3

Deux véhicules A et B, assimilés à des points mobiles se déplacent à vitesses constantes sur une voie rectiligne et horizontale.



À l'instant $t = 0$ s, la distance qui les sépare l'un de l'autre est $D = 675$ m.

La position de A sera considérée comme origine des espaces.

Vitesse du véhicule A : $v_A = 25$ m/s.

Vitesse du véhicule B : $v_B = 20$ m/s.

- 1- Détermine l'instant t_c où les deux véhicules se croisent.
- 2- Détermine la distance d_1 parcourue par le mobile A avant le croisement.

Résolution de l'exercice 1

- 1- Composantes du vecteur vitesse instantanée.

$$\vec{v} \begin{cases} V_x = 2 \text{ m/s} \\ V_y = -5 \text{ m/s} \end{cases}$$

- 2- Valeur de la vitesse

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \text{ A.N } v = \sqrt{29} = 5,4 \text{ m/s}$$

- 3- Équation cartésienne de la trajectoire et nature de la trajectoire.

$$\begin{cases} x = 2t - 1 \\ y = 4 - 5t \end{cases}$$

De $x = 2t - 1$ on tire $t = \frac{x+1}{2}$. En remplaçant dans y , on a :

$$y = 4 - 5\left(\frac{x+1}{2}\right)$$

$y = -\frac{5}{2}x + \frac{3}{2}$. C'est l'équation d'une portion de droite. La trajectoire du mobile est rectiligne.

Commentaire :

- Savoir que les équations horaires sont : $x(t) = 2t - 1$ et $y(t) = -5t + 4$.
- Savoir la forme de l'équation d'une droite affine.

Résolution de l'exercice 2

1- Valeur de la vitesse initiale

D'après l'équation horaire, la vitesse initiale est nulle : $V_0 = 0$ m/s.

2- Valeur de l'accélération

L'équation horaire étant de la forme $x(t) = \frac{1}{2} a_x t^2 + x_0$, alors $a_x = 4$ m/s².

3- Distance d parcourue

A $t_1 = 1,5$ s, $x_1 = 3,5$ m et à $t_2 = 2$ s, $x_2 = 7$ m.

D'où $d = |x_2 - x_1| = 3,5$ m.

Commentaire :

- Connaître ici, la forme de l'équation horaire d'un mouvement uniformément varié.
- Connaître la définition de la distance entre deux points A et B.

Résolution de l'exercice 3

1- Instant de croisement

Établissons les équations horaires des mouvements (A origine des espaces).

$x_A(t) = 25t$ et $x_B(t) = -20t + 675$

Il y a croisement lorsque $x_A = x_B$. Soit $25t = -20t + 675$. On tire $t_c = 15$ s.

Ils se croisent 15 s après.

2- Distance parcourue

$d_1 = 25 \times 15 = 315$ m.

Commentaire :

- Comprendre ce que signifie "instant de croisement" et traduire en relation mathématique.
- L'un des véhicules se déplace dans un sens contraire à l'autre ; en tenir compte pour la valeur algébrique de la vitesse de B.

V- JE M'EXERCE**Exercices de fixation/ Application**

1 Le vecteur position d'un mobile en mouvement dans le plan muni du repère $(O, \vec{i}, \vec{j})$ est donné par : $\vec{OM} = (2t^2 - 1)\vec{i} + 4t\vec{j}$.

1- A l'instant initial $t_0 = 0$, le mobile se trouve :

- au point origine du repère d'espace ;
- au point M_0 de coordonnées $x_0 = 1$ et $y_0 = 4$;
- au point M_0 de coordonnées $x_0 = -1$ et $y_0 = 0$.

2- Le vecteur vitesse du mobile a pour expression :

- $\vec{V} = 2t\vec{i} + 4\vec{j}$;
- $\vec{V} = 4t\vec{i} + 4\vec{j}$;
- $\vec{V} = (2t-1)\vec{i} + 4\vec{j}$.

3- La valeur de la vitesse du mobile

- est constante ;
- est nulle ;
- dépend du temps t.

Recopie, pour chaque proposition, le numéro suivi de la lettre correspondant à la bonne réponse.

2 Recopie le numéro de l'affirmation puis écris V si elle est vraie ou F si elle est fausse.

- 1- Le vecteur-vitesse est constant au cours d'un mouvement rectiligne et uniforme.
- 2- L'accélération d'un mobile s'exprime en m/s.
- 3- Dans un mouvement rectiligne et uniformément varié, le produit scalaire $\vec{a} \cdot \vec{v}$ est toujours nul.
- 4- Dans un mouvement circulaire et uniforme, la direction du vecteur vitesse varie.

3 Reproduis et complète le tableau ci-dessous en y écrivant l'expression du vecteur vitesse.

Vecteur position	Vecteur vitesse
$\vec{OM}_1 = 2t\vec{i}$	$\vec{V}_1 = \dots\dots\dots$
$\vec{OM}_2 = -t\vec{i} + 4t\vec{j}$	$\vec{V}_2 = \dots\dots\dots$
$\vec{OM}_3 = -\frac{1}{2}t\vec{i} + 2t\vec{j}$	$\vec{V}_3 = \dots\dots\dots$
$\vec{OM}_4 = (4t - 1)\vec{i}$	$\vec{V}_4 = \dots\dots\dots$

4 Recopie chacune des phrases suivantes en y ajoutant le mot ou groupe de mot qui convient.

- 1- Le vecteur vitesse instantanée est la dérivée par rapport au temps du vecteur du mobile.
- 2- Dans un mouvement circulaire et uniforme, le vecteur accélération est dirigé vers le centre du cercle.
- 3- L'équation horaire $x(t) = 2t + 1$ est celle d'un mouvement uniforme.

Exercices de renforcement/ Approfondissement

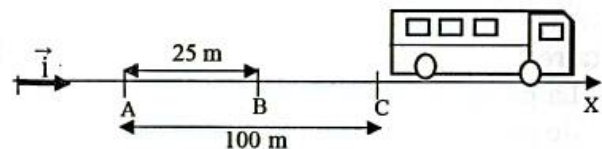
5 Dans le plan (Ox, Oy) muni du repère $(O, \vec{i}, \vec{j})$, le vecteur position d'un mobile est tel que :

$$\vec{OM} = (2t^2 - 3t)\vec{i} + (t^2 - 1)\vec{j} \text{ avec } 0 < t < 10 \text{ s.}$$

- 1- Établis les équations horaires du mouvement du mobile.
- 2- Détermine les composantes :
 - 2.1- du vecteur vitesse ;
 - 2.2- du vecteur accélération.
- 3- Détermine la valeur du vecteur vitesse du mobile à la date $t = 1,5$ s.
- 4- Détermine l'intervalle de temps pour lequel le mouvement du mobile est accéléré.

6 Deux élèves en retard tentent de rattraper un bus.

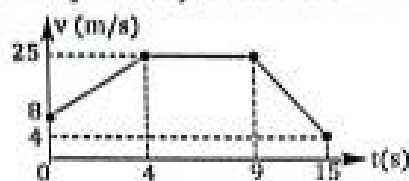
- L'élève E_1 , animé d'un mouvement rectiligne et uniforme suivant l'axe Ox, passe au point A à la vitesse $V_{1x} = 12$ m/s.
- L'élève E_2 part du repos du point B en s'imposant une accélération supposée constante $a_{2x} = 2$ m/s².
- Le bus démarre à la date $t = 0$ du point C avec une accélération constante $a_x = 1,5$ m/s² au même moment que les deux élèves E_1 et E_2 .



- 1- Établis en prenant comme origine des espaces la position initiale du bus :
 - 1.1- l'équation horaire $x(t)$ du bus ;
 - 1.2- l'équation horaire $x_1(t)$ de l'élève E_1 ;
 - 1.3- l'équation horaire $x_2(t)$ de l'élève E_2 .
- 2- Montre par les calculs que l'élève E_1 ne peut rattraper le bus.
- 3- Détermine :
 - 2.2- la date t à laquelle l'élève E_2 rattrape le bus ;
 - 2.3- la distance d parcourue par l'élève E_2 avant le rattrapage du bus.
- 4- Détermine, par rapport à l'origine des espaces choisie, la position x_1 de l'élève E_1 au moment où l'élève E_2 rattrape du bus.

7 Le diagramme ci-dessous représente le graphe de la variation de la vitesse d'un véhicule en fonction du temps. Le véhicule se déplace entre deux villages A et B sur une voie rectiligne et horizontale. Le point A est pris comme origine des espaces.

$t \in [0; 15]$. La trajectoire est munie du repère $(A, \vec{i})$

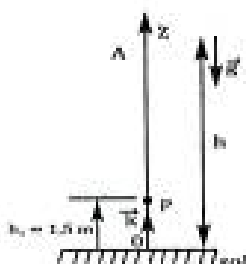


- 1- Détermine les accélérations a_{1x} , a_{2x} et a_{3x} du véhicule dans les trois phases du mouvement.
- 2- Donne la nature du mouvement du véhicule pour chacune des phases.
- 3- Établis l'équation horaire du mouvement du véhicule dans sa phase d'accélération.
- 4- Détermine la distance totale D parcourue par le véhicule avant la phase de décélération.

8 Deux noix de coco chutent librement du cocotier l'une après l'autre.

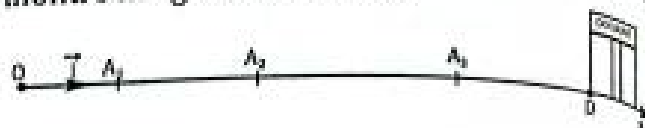
On étudie le mouvement de chacune des noix suivant l'axe vertical (Oz) de vecteur unitaire $\vec{k}$.

- La première noix N_1 part du point A de la branche à une date t_0 prise comme instant initial.
- La deuxième noix N_2 part du même point du cocotier 0,5 seconde plus tard.



- 1- Établis l'équation horaire $z(t)$ du mouvement de chacune des noix soumise à la même accélération de valeur $g = 9,8 \text{ m/s}^2$.
- 2- Détermine la hauteur h du cocotier sachant que la deuxième noix met 2 s pour atteindre le sol.
- 3- Détermine la date à laquelle la noix N_1 passe par le point P de l'axe (O, z) . Déduis la valeur algébrique de sa vitesse à cette date.
- 4- Détermine la vitesse initiale V_{0z} qu'il faut communiquer à N_2 pour qu'elle atteigne N_1 à 1,5 m du sol.

9 On étudie le mouvement d'une automobile circulant sur une route horizontale comme le montre la figure ci-dessous.



Les points A_1 , A_2 et A_3 représentent les positions de trois bornes kilométriques quelconques. L'automobiliste part du point O, du repos et impose à son véhicule, un mouvement rectiligne et uniformément accéléré d'accélération constante. Subitement, il aperçoit un poste de contrôle de douane. Il freine énergiquement au point A_3 puis s'arrête peu après au point D. Le tableau ci-dessous donne les positions occupées par l'automobile ainsi que les dates correspondantes.

Points	A_1	A_2	A_3	D
Positions x(en km)	0,5	1,5	2	2,6
Dates(en min)	2			

L'origine des espaces étant toujours en O.

1- Détermine :

- 1.1- l'accélération a_{1x} de l'automobile sur le trajet $A_1 A_3$;
- 1.2- la date t_2 à laquelle l'automobile passe devant la borne A_2 .

2- Déduis la vitesse v_{1x} de l'automobile à cette borne kilométrique.

3- Détermine :

- 3.1- la vitesse v_{3x} de l'automobile au point A_3 ;
- 3.2- l'accélération constante a_{3x} de l'automobile pendant le temps de freinage.

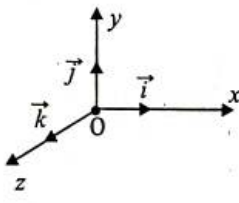
4- Établis l'équation horaire du mouvement de l'automobile sur le tronçon $A_3 D$ en prenant le passage en A_3 comme origine des dates.

Situations d'évaluation

10 Pour vérifier les acquis sur le cours de cinématique du point, un professeur de Physique-Chimie propose à un groupe d'élèves de Tle C, d'étudier le mouvement d'un projectile.

Le projectile, assimilé à un point mobile, est lancé dans l'espace. On rapporte l'étude à un repère d'espace $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$.

On donne les équations horaires de son mouvement.

$$\vec{OM} \begin{cases} x(t) = 5 - 3t \\ y(t) = -\frac{1}{8}t^2 + 10t \\ z(t) = 2,5 \end{cases}$$


Tu es désigné (e) par tes camarades de classe pour présenter ton résultat.

- 1- Donne la définition d'un mouvement rectiligne et uniforme.
- 2- Détermine les coordonnées du vecteur position $\vec{OM}_0$, à l'origine des dates ($t = 0$).
- 3- Montre que la trajectoire du projectile est plane.
- 4- Détermine :
 - 4.1- la date t_p à laquelle le projectile rencontre l'axe Ox ;
 - 4.2- la vitesse du projectile à la date t_p ;
 - 4.3- l'intervalle de temps dans lequel le mouvement du projectile est uniformément retardé.

11 Arrêté à un feu tricolore, tu as suivi un acte d'incivisme d'un cycliste qui a « grillé » le feu avant de s'arrêter.

Le cycliste roulant à vive allure atteint le point A à une distance $d = 50$ m du feu avec la vitesse $V_A = 54$ km/h. Le feu est passé en ce moment au rouge. Il a commencé à freiner à partir du point B, une seconde plus tard avec une décélération constante $a_{1x} = -2,5$ m/s² pendant une durée $\Delta t = 4$ s jusqu'à l'arrêt au point C.

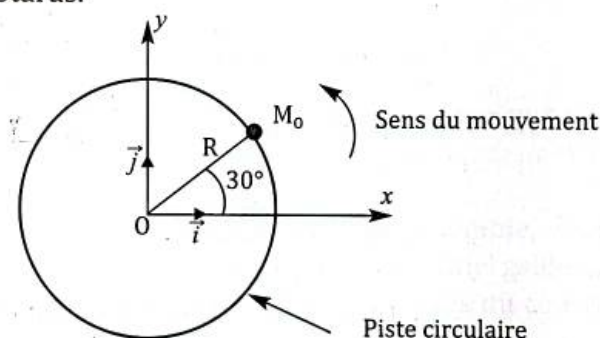
La position du feu tricolore et le début du freinage seront respectivement pris comme origine des espaces et des dates.



- 1- Définis un mouvement rectiligne et uniformément varié.
- 2- Détermine :
 - 2.1- l'abscisse x_B de la position du début de freinage ;
 - 2.2- l'abscisse x_C de la position d'arrêt du cycliste.
- 3- Détermine l'accélération a_{2x} avec laquelle le cycliste s'arrête au feu tricolore en freinant à partir de B.

12 Tu as suivi la partie sportive du journal télévisé au cours de laquelle des motocyclistes, en compétition, se déplaçaient sur leurs engins à des vitesses extrêmement élevées.

Tu modélises la situation par la figure ci-dessous et tu décides d'étudier le mouvement de l'un des motards.



Données :

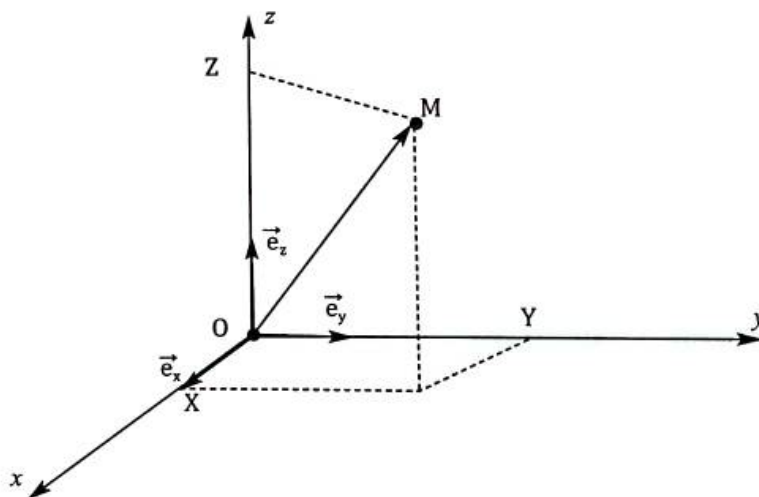
- vitesse angulaire du motard : $\omega = 0,314$ rad/s ;
 - rayon de la trajectoire ; $R = 200$ m
- 1- Définis un mouvement circulaire et uniforme.
 - 2- Établis l'expression de l'abscisse curviligne $s(t)$ du motocycliste à chaque instant.
 - 3- Établis dans le repère (Ox, Oy) , les équations horaires du mouvement du motard.
 - 4- Détermine :
 - 4.1- les composantes du vecteur vitesse $\vec{v}$, dans le repère (Ox, Oy) à la date $t = 2$ s ;
 - 4.2- la période T du mouvement du motard et le nombre de tours qu'il a effectué en une durée $\Delta t = 1$ min 20 s.

VI- RENDEZ-VOUS DES CURIEUX

CINÉMATIQUE ET DYNAMIQUE

La plupart des objets étudiés par les physiciens sont en mouvement : depuis les particules élémentaires telles que les électrons, les protons et les neutrons qui constituent les atomes, jusqu'aux galaxies, en passant par les objets usuels et les corps célestes. On ne peut espérer bien comprendre comment fonctionne la nature que si l'on est capable de définir clairement le mouvement. La branche de la physique à laquelle appartient l'étude des mouvements s'appelle la mécanique. La mécanique se subdivise en cinématique et dynamique. La cinématique consiste à décrire la manière dont un corps se déplace dans l'espace en fonction du temps sans s'attacher aux causes qui produisent ce mouvement. La dynamique, par contre, s'intéresse à ces causes : les forces ; elle relie les forces au mouvement. En mécanique, les études portent en général sur le mouvement des points matériels.

Par définition, un point matériel est un objet sans dimensions spatiales. Bien entendu, dans la plupart des cas, il s'agit d'une simplification, les objets réels occupant généralement un espace restreint. Néanmoins, ce concept est utile dans bon nombre de situations réelles où on ne s'intéresse pas aux rotations de l'objet sur lui-même ou lorsque les dimensions de l'objet peuvent être négligées. C'est notamment le cas des charges électriques en mouvement dans un circuit électrique.



LEÇON

2

MOUVEMENT DU CENTRE D'INERTIE D'UN SOLIDE

TABLEAU DES HABILETÉS ET DES CONTENUS

HABILETÉS	CONTENUS
Définir	un référentiel galiléen.
Connaître	quelques référentiels galiléens (référentiel terrestre ; référentiel géocentrique ; référentiel héliocentrique).
Énoncer	le théorème du centre d'inertie.
Appliquer	- le théorème du centre d'inertie. - le théorème de l'énergie cinétique.

NOTIONS ESSENTIELLES

- Système isolé et pseudo -isolé
- Référentiel galiléen
- Centre d'inertie
- Théorème du centre d'inertie
- Énergie cinétique

SITUATION D'APPRENTISSAGE

Tu apprends, après avoir suivi un documentaire sur une émission scientifique qu'il existe, pour certains référentiels dits galiléens, une relation entre le vecteur accélération d'un solide en mouvement et la somme vectorielle des forces auxquelles il est soumis.

Curieux d'en savoir plus, tu partages l'information avec tes camarades de classe. Ensemble, vous entreprenez, sous la conduite de votre professeur de Physique-Chimie de définir un référentiel galiléen, de connaître le théorème du centre d'inertie et d'appliquer correctement les théorèmes du centre d'inertie et de l'énergie cinétique.

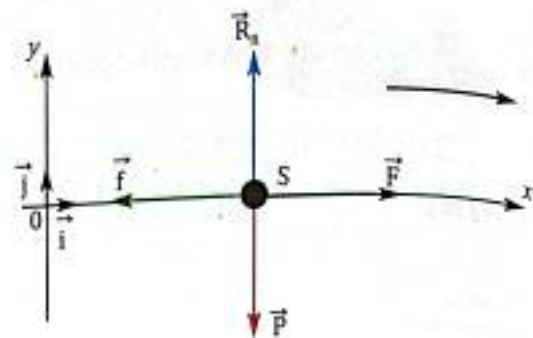


I- ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1 : RAPPELER QUELQUES GÉNÉRALITÉS

Observe le document 1 ci-contre.

- 1- Fais l'inventaire des forces qui agissent sur le système S.
- 2- En supposant que ces forces ont des effets qui se compensent, que peux-tu dire du système ?
- 3- Donne la nature du mouvement du centre d'inertie d'un tel système en mouvement.
- 4- Rappelle le principe de l'inertie.



Document 1 : Forces s'exerçant sur un système

Je fais le point de l'activité

- 1- Les forces qui agissent sur le système sont : $\vec{f}$, $\vec{F}$, $\vec{P}$ et $\vec{R}_n$.
- 2- Si les effets de ces quatre (4) forces se compensent, alors le système est dit pseudo-isolé.
- 3- Un système est dit isolé s'il ne subit aucune action mécanique extérieure. Il est dit pseudo-isolé si les effets des forces extérieures qui s'exercent sur lui se compensent.
- 4- Le principe de l'inertie

Le centre d'inertie d'un système isolé ou pseudo-isolé est soit :

- immobile si le système est initialement au repos ;
- animé d'un mouvement rectiligne et uniforme si le système est en mouvement.

J'évalue mes acquis



Un solide est en mouvement, sur un plan horizontal, sous l'action des forces suivantes : la force de traction $\vec{F}$, la réaction normale $\vec{R}_n$, son poids $\vec{P}$ et les forces de frottements équivalentes à une force $\vec{f}$.

Les valeurs des forces $\vec{F}$ et $\vec{f}$ étant telles que $F > f$, le solide est :

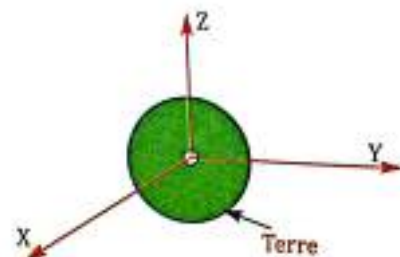
- a) isolé ;
- b) pseudo-isolé ;
- c) ni isolé, ni pseudo-isolé.

Recopie la bonne option.

ACTIVITÉ 2 : DÉFINIR UN RÉFÉRENTIEL GALILÉEN

Observe le document 2.

- 1- Nomme ce type de référentiel.
- 2- Que dit-on d'un référentiel dans lequel le principe de l'inertie est vérifié ?
- 3- Donne-en des exemples.



Document 2 : Un exemple de référentiel

Je fais le point de l'activité

1- Le type de référentiel présenté dans le document 2 est dit galiléen.

2- Définition d'un référentiel galiléen

Un référentiel galiléen est un référentiel dans lequel le principe de l'inertie est vérifié.

N.B : Tout référentiel en translation rectiligne et uniforme par rapport à un référentiel galiléen est aussi galiléen.

3- Quelques exemples de référentiel galiléen

- Le référentiel terrestre ou référentiel du laboratoire : c'est un référentiel lié à la Terre. Il est utilisé pour les expériences réalisées sur la Terre ; il peut être supposé galiléen si l'étude est de courte durée. L'origine O du repère d'axes peut être prise en n'importe quel point lié à la Terre.

- Le référentiel géocentrique

Il est aussi lié à la Terre. Il est utilisé pour décrire le mouvement des satellites de la Terre (Lune, satellites artificiels...).

Le centre de la Terre est l'origine du repère dont les trois axes pointent vers des étoiles supposées fixes et suffisamment éloignées.

Il peut être considéré comme galiléen si l'étude ne dépasse pas quelques jours.

- Le référentiel héliocentrique

Il est lié au Soleil. Il est utilisé pour décrire le mouvement des planètes du système solaire.

Le centre du Soleil est l'origine du repère dont les trois axes sont dirigés vers trois étoiles, très lointaines supposées fixes.

Il peut être considéré comme galiléen si l'étude du mouvement ne dépasse pas plusieurs millions d'années afin de négliger le mouvement du système solaire.

J'évalue mes acquis

1- Définis un référentiel galiléen.

2- Cite deux référentiels que l'on peut supposer galiléens.

ACTIVITÉ 3 : DÉCOUVRIR LE THÉORÈME DU CENTRE D'INERTIE ET L'APPLIQUER

Lors du mouvement de chute libre d'une bille, les positions

M_i de celle-ci sont photographiées à intervalles de temps égaux

$\tau = 33,3$ ms. Au début du mouvement, la chute étant relativement lente, il n'est pas possible de séparer les premières images de la bille.

Le point M_0 est choisi comme position initiale et la date du lâché correspond à l'instant initial ($t = 0$ s). La résistance de l'air est négligée.



Document 3 : Chronophotographie d'une bille en chute libre

	M_1	M_0	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}
Abscisse (cm)	12	17,5	24	32	40,5	50,5	61,6	73,5	87	101,5	116,5	133
Date t	-	0	τ	2τ	3τ	4τ	5τ	6τ	7τ	8τ	9τ	10τ
Vitesse V (en m/s)												

- 1- Écris la relation utilisée pour déterminer la vitesse instantanée en chaque point M_i .
- 2- Calcule les vitesses instantanées puis complète le tableau.
- 3- Trace la courbe $V = f(t)$ et précise sa nature.
- 4- Détermine la pente de la courbe et compare-la à la valeur de g ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$).
- 5- Fais le bilan des forces extérieures qui s'exercent sur la bille en chute libre.
- 6- Dédus-en une relation entre $\sum \vec{F}_{\text{ext}}$ somme des forces extérieures appliquées à la bille, le vecteur accélération $\vec{a}$ et la masse m de la bille.

Je fais le point de l'activité

- 1- Détermination de la vitesse instantanée v_i en un point M_i

$$V_i = \frac{M_{i-1}M_{i+1}}{t_{i+1} - t_{i-1}} = \frac{M_{i-1}M_{i+1}}{2\tau}$$

- 2- Calcul des vitesses instantanées

$$V_1 = \frac{M_0M_2}{2\tau} = \frac{(32 - 17,5) \cdot 10^{-2}}{(2 \times 33,3) \cdot 10^{-3}} = 2,18 \text{ m.s}^{-1}$$

$$V_2 = \frac{M_1M_3}{2\tau} = \frac{(40,5 - 24) \cdot 10^{-2}}{(2 \times 33,3) \cdot 10^{-3}} = 2,48 \text{ m.s}^{-1}$$

$$V_3 = \frac{M_2M_4}{2\tau} = \frac{(50,5 - 32) \cdot 10^{-2}}{(2 \times 33,3) \cdot 10^{-3}} = 2,78 \text{ m.s}^{-1}$$

$$V_4 = \frac{M_3M_5}{2\tau} = \frac{(61,6 - 40,5) \cdot 10^{-2}}{(2 \times 33,3) \cdot 10^{-3}} = 3,17 \text{ m.s}^{-1}$$

$$V_5 = \frac{M_4M_6}{2\tau} = \frac{(73,5 - 50,5) \cdot 10^{-2}}{(2 \times 33,3) \cdot 10^{-3}} = 3,45 \text{ m.s}^{-1}$$

$$V_6 = \frac{M_5M_7}{2\tau} = \frac{(87 - 61,6) \cdot 10^{-2}}{(2 \times 33,3) \cdot 10^{-3}} = 3,81 \text{ m.s}^{-1}$$

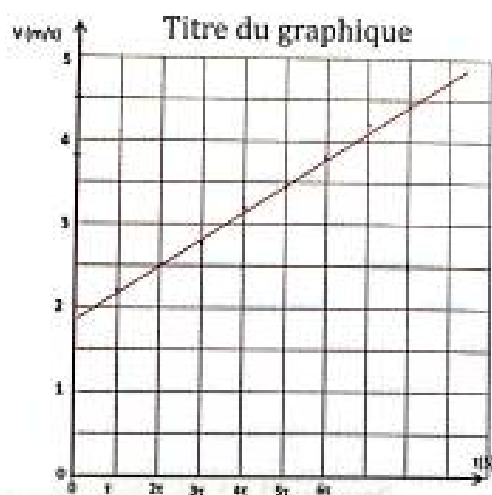
$$V_7 = \frac{M_6M_8}{2\tau} = \frac{(101,5 - 73,5) \cdot 10^{-2}}{(2 \times 33,3) \cdot 10^{-3}} = 4,2 \text{ m.s}^{-1}$$

$$V_8 = \frac{M_7M_9}{2\tau} = \frac{(116,5 - 87) \cdot 10^{-2}}{(2 \times 33,3) \cdot 10^{-3}} = 4,43 \text{ m.s}^{-1}$$

$$V_9 = \frac{M_8M_{10}}{2\tau} = \frac{(133 - 101,5) \cdot 10^{-2}}{(2 \times 33,3) \cdot 10^{-3}} = 4,73 \text{ m.s}^{-1}$$

Instant (t_i)	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9
Vitesse V_i (en m.s^{-1})	2,18	2,48	2,78	3,17	3,45	3,81	4,2	4,43	4,73

- 3-Courbe $v = f(t)$



On obtient une courbe pouvant être linéarisée, de pente $\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{3,81 - 2,18}{5\tau} = \frac{3,81 - 2,18}{5 \times 0,0333} = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$.
 $\frac{\Delta V}{\Delta t} \approx 2 \text{ g}$ (g étant l'intensité de la pesanteur terrestre).

4- Bilan des forces extérieures qui s'exercent sur la bille en chute libre

La résistance de l'air étant négligée, la bille n'est soumise qu'à son poids $\vec{P}$. Donc $\vec{P} = m\vec{g}$.

L'accélération du centre d'inertie de la bille est $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t}$ donc $\vec{a} = \vec{g}$; d'où $\vec{P} = m\vec{g} = m\vec{a}$.

La somme des forces extérieures appliquées au solide est égale au produit de sa masse par le vecteur accélération de son centre d'inertie.

Les résultats expérimentaux ont permis de montrer que :

$$\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{P} = m\vec{a}$$

5-Généralisation

Énoncé du théorème du centre d'inertie

Dans un référentiel galiléen, la somme vectorielle des forces extérieures appliquées à un système est égale au produit de sa masse m par le vecteur accélération $\vec{a}_G$ de son centre d'inertie.

Ce qui se traduit par la relation : $\sum \vec{F}_{\text{ext}} = m\vec{a}_G$.

J'évalue mes acquis



Dans un référentiel galiléen, un solide de masse $m = 10 \text{ kg}$, en mouvement sur une piste horizontale, est soumis à quatre forces extérieures : son poids $\vec{P}$, la réaction $\vec{R}$ de la piste, la force de traction $\vec{T}$ et la force de frottement $\vec{f}$.

Son vecteur accélération est noté $\vec{a}_x$, $T = 120 \text{ N}$ et $f = 70 \text{ N}$.

- 1- Écris la relation vectorielle qui traduit le théorème du centre d'inertie.
- 2- Détermine l'accélération a_x .

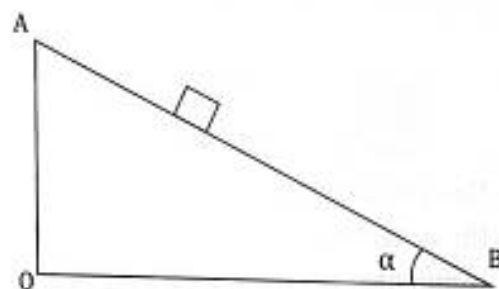
ACTIVITÉ 4 : APPLIQUER LE THÉORÈME DE L'ÉNERGIE CINÉTIQUE

Sur un plan incliné AB de longueur ℓ , un solide est lancé à partir du point A avec la vitesse v_A .

On se propose de déterminer l'expression de la vitesse acquise par la bille au point B.

Les forces de frottements exercées par la piste sur le solide sont équivalentes à une force unique $\vec{f}$.

- 1- Fais l'inventaire des forces extérieures appliquées au solide.
- 2- Rappelle l'énoncé du théorème de l'énergie cinétique.
- 3- Écris la relation qui traduit le théorème de l'énergie cinétique entre les instants t_A et t_B respectivement aux points A et B.
- 4- Donne un protocole de résolution des exercices de dynamique.



Je fais le point de l'activité

1- Les forces extérieures appliquées au solide
Les forces appliquées au solide sont les suivantes :

- le poids $\vec{P}$ du solide ;
- la réaction normale $\vec{R}_n$ de la piste ;
- la force de frottement $\vec{f}$.

2- Énoncé du théorème de l'énergie cinétique

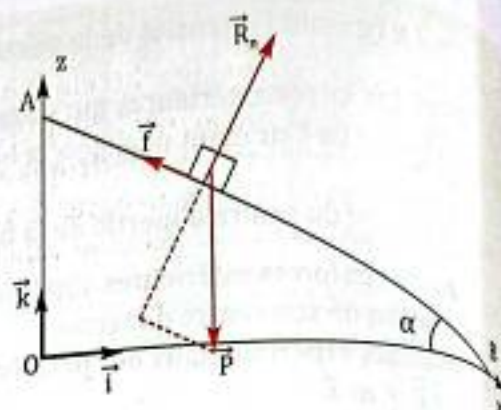
Dans un référentiel galiléen, la variation de l'énergie cinétique d'un solide, entre deux instants, est égale à la somme algébrique des travaux des forces extérieures appliquées au solide.

Ce qui se traduit par la relation : $\Delta E_{C(A \rightarrow B)} = \sum W(\vec{F}_{ext})$.

3- Méthode de résolution d'un exercice de dynamique

Pour résoudre correctement un exercice de dynamique, il faut observer le protocole ci-dessous.

- 1- Préciser le système étudié.
- 2- Choisir un référentiel muni d'un repère galiléen.
- 3- Faire l'inventaire ou le bilan des forces extérieures appliquées au système.
- 4- Appliquer convenablement le théorème approprié pour la question posée : soit le théorème du centre d'inertie, soit le théorème de l'énergie cinétique.

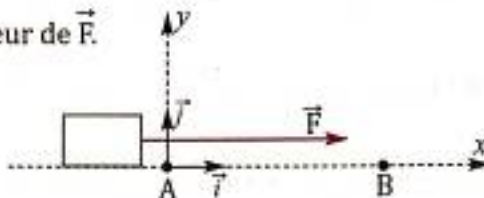


J'évalue mes acquis



Une force motrice constante $\vec{F}$ déplace horizontalement un solide de masse $m = 2 \text{ kg}$ sur une longueur $AB = \ell = 2 \text{ m}$. Cette force fait passer la vitesse du solide de $v_A = 2 \text{ m/s}$ à $v_B = 5 \text{ m/s}$.

- 1- Détermine la valeur de l'accélération du solide supposée constante au cours du mouvement.
- 2- Détermine la valeur de $\vec{F}$.



II- RÉSUMÉ DE COURS

- Un système est dit isolé s'il ne subit aucune action mécanique de la part du milieu extérieur.
- Un système est dit pseudo-isolé si les actions mécaniques que le milieu extérieur exerce sur lui se compensent.
- Un référentiel galiléen est un référentiel dans lequel le principe de l'inertie est vérifié.
- Dans un référentiel galiléen, la somme vectorielle des forces extérieures appliquées à un système est égale au produit de sa masse par le vecteur accélération de son centre d'inertie.
Ce qui se traduit par la relation : $\sum \vec{F}_{ext} = m\vec{a}_G$ (théorème du centre d'inertie).
- Dans un référentiel galiléen, la variation de l'énergie cinétique d'un solide, entre deux instants, est égale à la somme algébrique des travaux des forces extérieures appliquées au solide.
Ce qui se traduit par la relation : $\Delta E_{C(A \rightarrow B)} = \sum W(\vec{F}_{ext})$ (théorème de l'énergie cinétique).

III- MÉTHODES

- Pour appliquer le théorème du centre d'inertie, le référentiel choisi doit être supposé galiléen.
- Dans un problème faisant intervenir le théorème du centre d'inertie, il est toujours nécessaire de :
 - faire le bilan des forces extérieures agissant sur le système ;
 - représenter qualitativement ces forces sur une figure ;
 - faire des projections dans le repère d'axes choisi afin d'établir l'expression algébrique de l'accélération.

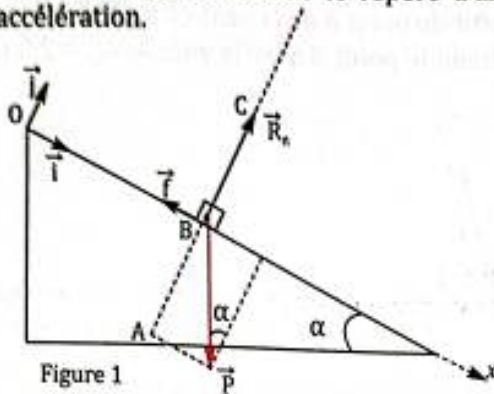


Figure 1

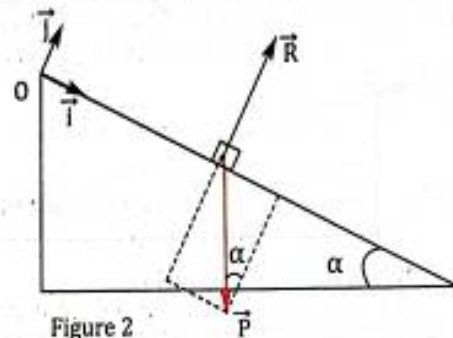


Figure 2

Dans le repère $(O, \vec{i}, \vec{j})$, si le solide de masse m qui descend est soumis à des forces de frottement,

la valeur algébrique de l'accélération est : $a_x = g \sin \alpha - \frac{f}{m}$. (Figure 1)

Dans le repère $(O, \vec{i}, \vec{j})$, si le solide de masse m descend sans effet de force de frottement, la valeur algébrique de l'accélération est : $a_x = g \sin \alpha$. (Figure 2)

Dans la représentation des forces sur une trajectoire rectiligne, s'assurer que la somme des forces est nulle sur l'axe perpendiculaire à celui du mouvement.

$AB = BC$.

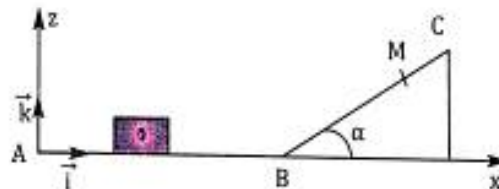
IV- EXERCICES RÉSOLUS

Exercice 1

On lance un solide de masse m sur le plan horizontal AB. Elle passe au point B avec la vitesse de 2 m/s puis remonte la pente BC avant de redescendre.

On néglige les forces de frottement et on suppose que la bille s'arrête en M juste avant de redescendre. Détermine la longueur du trajet BM.

Données : $g = 10 \text{ m/s}^2$; $\alpha = 35^\circ$.



Exercice 2

Abandonné au point A sans vitesse initiale, un solide de masse m , assimilable à un point matériel se déplace suivant le profil ABC ci-contre.

La portion AB est parfaitement lisse.

Le solide s'immobilise au point C en raison des forces de frottement de sens opposées à son mouvement entre B et C.

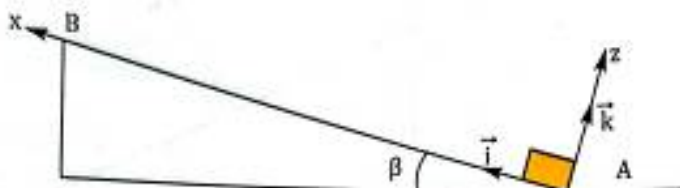


Données : $\alpha = \frac{\pi}{3} \text{ rad}$; $g = 10 \text{ m/s}^2$; $m = 100 \text{ g}$; $BC = L = 0,7 \text{ m}$; $r = OB = 1,2 \text{ m}$.

- 1- Détermine la vitesse V_{Bx} du solide en B.
- 2- Détermine l'accélération a_x du mouvement sur BC.
- 3- Dédus-en l'intensité f des forces de frottement.

Exercice 3

À une date t_0 prise comme instant initial, on lance à partir du point A de la pente, un solide de masse m . Il se déplace sur le plan incliné, sans frottement et atteint le point B avec la vitesse $v_{Bx} = 2,5 \text{ m/s}$, en $\Delta t = 1 \text{ s}$.



Données : $g = 9,8 \text{ m/s}^2$; $\beta = 30^\circ$.

- 1- Fais le bilan des forces extérieures appliquées au solide au cours du mouvement.
- 2- Établis l'expression de l'accélération a_x du mouvement dans le repère $(A, \vec{i}, \vec{k})$.
- 3- Détermine la vitesse initiale v_A du solide au point A.

Résolution de l'exercice 1

Déterminons la longueur de BM

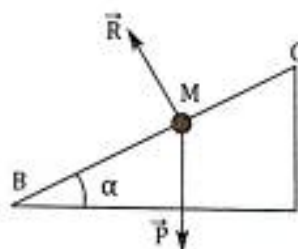
Système : la bille

Référentiel d'étude : terrestre supposé galiléen

Bilan des forces :

Faisons le bilan des forces extérieures appliquées à la bille sur BC et représentons-les sur une figure.

- Le poids $\vec{P}$ de la bille.
- La réaction $\vec{R}$ du support BC.



La bille s'arrête en M ($v_M = 0$).

Appliquons le théorème de l'énergie cinétique.

$$\frac{1}{2} m v_M^2 - \frac{1}{2} m v_B^2 = W_{BM}(\vec{R}) + W_{BM}(\vec{P}) = -mg.BM.\sin\alpha \quad (\text{car } W_{BM}(\vec{R}) = 0)$$

En tenant compte des valeurs nulles, on a : $BM = L = \frac{v_B^2}{2g\sin\alpha}$

L'application numérique donne : $BM = 0,348 \text{ m}$.

Commentaire :

- Quand un solide s'immobilise en un point, sa vitesse est nulle en ce point.
- L'objet remonte la pente. Le travail du poids est résistant : $W(\vec{P}) = -mgh$.

Résolution de l'exercice 2

1- Déterminons la vitesse en B

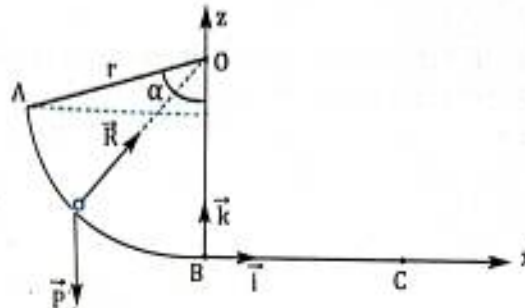
Système : le solide

Référentiel d'étude : terrestre supposé galiléen

Bilan des forces :

Faisons le bilan des forces extérieures appliquées à la bille sur la portion circulaire AB et représentons-les sur une figure.

- Le poids $\vec{P}$ de la bille.
- La réaction $\vec{R}$ du support AB.

La vitesse en A est nulle ($v_{Ax} = 0$).

Appliquons le théorème de l'énergie cinétique au solide.

$$\frac{1}{2}mv_B^2 - \frac{1}{2}mv_A^2 = W_{AB}(\vec{R}) + W_{AB}(\vec{P}) = mgr(1 - \cos\alpha) \text{ car } W_{AB}(\vec{R}) = 0.$$

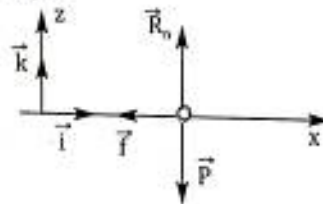
Soit $V_B^2 = 2gr(1 - \cos\alpha)$. On déduit $V_{Bx} = \sqrt{2gr(1 - \cos\alpha)}$ AN : $V_{Bx} = 3,46 \text{ m/s}$.

2- Accélération sur BC.

L'accélération étant constante, le mouvement est rectiligne et uniformément varié.

On sait que $a_x = \frac{\Delta v_x^2}{2\Delta x}$ avec $\Delta x = x_C - x_B$. D'où $a_x = -8,57 \text{ m/s}^2$.

Déterminons l'intensité des forces de frottement :

L'application du théorème du centre d'inertie donne : $-f = ma_x$. D'où $f = 0,857 \text{ N}$.**Commentaire :**

- Appliquer correctement le théorème de l'énergie cinétique sur une portion circulaire lorsqu'il y a une dénivellation h entre les points A (départ) et B (arrivée).
- Connaître les relations établies en cinématique du point.
- Pour l'application du théorème du centre d'inertie, faire la projection sur l'axe orienté dans le sens du mouvement.
- Mettre la calculatrice en mode radian avant de faire l'application numérique.

Résolution de l'exercice 3

1- Faisons le bilan des forces extérieures

Système : le solide de masse m

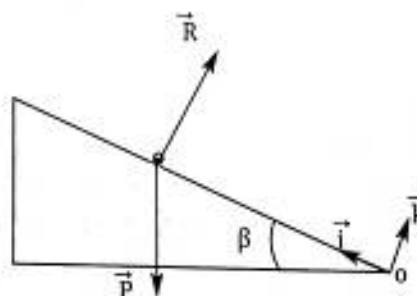
Référentiel d'étude : terrestre supposé galiléen

Bilan des forces des forces extérieures

appliquées à la bille sur BC.

- le poids $\vec{P}$.
- la réaction $\vec{R}$ du plan AB.

Représentons-les (voir figure).



2- Établissons l'expression de l'accélération a_x du mouvement dans le repère $(A, \vec{i}, \vec{k})$.
L'application du théorème du centre d'inertie et la projection de son expression dans le repère $(A, \vec{i}, \vec{k})$ donne :

$$-mg \sin \beta = ma_x, \text{ d'où } a_x = -g \sin \beta. \text{ On déduit } a_x = -4,9 \text{ m.s}^{-2}$$

3- Déterminons la vitesse initiale v_{Ax} du solide au point A

$$\text{Appliquons la relation } \Delta v = a_x \Delta t. \text{ On tire } v_{Ax} = v_{0x} - a_x \Delta t$$

$$v_{Ax} = 2,5 + 4,9 = 7,4 \text{ m/s.}$$

Commentaire :

- Application du théorème du centre d'inertie pour un solide qui monte une pente doit se faire avec beaucoup plus de délicatesse.
- Il faut connaître ici l'expression de l'accélération moyenne.
- Connaître ici encore les relations établies en cinématique sur le mouvement rectiligne et uniformément varié.

V- JE M'EXERCE

Exercices de fixation/ Application

1 L'étude des mouvements s'effectue dans des référentiels dits galiléens.

Un référentiel galiléen est un référentiel dans lequel :

- a- le principe de l'inertie peut être modifié ;
- b- le principe de l'inertie ne peut être appliqué ;
- c- le principe de l'inertie est vérifié ;

Recopie la bonne réponse.

2 Recopie chacune des phrases ci-dessous et complète-la avec le mot ou le groupe de mots qui convient.

- a- Dans un référentiella variation de l'énergied'un solide, entre deux instants est égale est à la sommedes travaux des forcesappliquées au solide.
- b- Dans un référentiel galiléen, la sommedes forces extérieures appliquées à un système solide est égale aude la masse par le vecteurde son centre

3 Reproduis et relie chaque terme de la colonne A à l'expression mathématique de la colonne B qui permet de l'exprimer.

Colonne A

Théorème de l'énergie cinétique •
Vecteur quantité de mouvement •
Théorème du centre d'inertie •

Colonne B

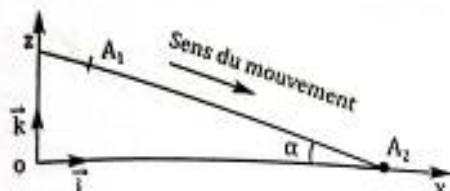
- $\vec{P} = m\vec{v}$
- $\sum \vec{F} = m\vec{a}_G$
- $\sum \vec{F} = \vec{0}$
- $\Delta E_c = \sum W(\vec{F}_{ext})$

4 Pour les affirmations suivantes, mets une croix dans la case qui convient.

N°	AFFIRMATIONS	Vrai	Faux
1	Un système est dit pseudo-isolé s'il est soumis à des forces dont les actions se compensent.		
2	Le référentiel terrestre est appelé aussi référentiel de Copernic.		
3	Pour un corps en chute libre, le théorème du centre d'inertie se traduit par $\vec{P} = -m\vec{g}$.		
4	La relation $\sum \vec{F}_{ext} = m \frac{d\vec{v}}{dt}$ traduit aussi le théorème de l'énergie cinétique.		
5	Le théorème de l'énergie cinétique peut s'appliquer à un solide animé d'un mouvement rectiligne et uniforme.		

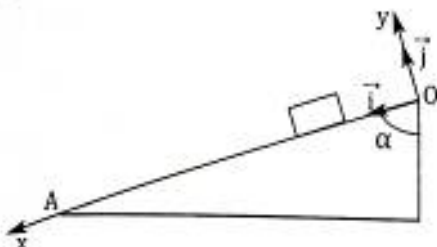
Exercices de renforcement/Approfondissement

5 Un skieur muni d'équipements descend, sans vitesse initiale, une pente inclinée d'un angle $\alpha = 20^\circ$ dans une zone de longueur $L = A_1 A_2 = 10 \text{ m}$. La réaction normale $\vec{R}_N$ de la piste sur les skis a pour valeur R_N . Détermine, la valeur de la force de frottement $\vec{f}$ supposée constante et opposée au sens du mouvement.



Données : masse $m = 92 \text{ kg}$; $g = 10 \text{ m/s}^2$; vitesse en A_2 : $V_2 = 2,5 \text{ m/s}$.

6 Un solide, bloqué initialement au sommet d'un plan incliné, est propulsé vers le bas avec une vitesse initiale $v_0 = 5 \text{ m/s}$. Il est soumis à des forces de frottements de valeur constante. Il passe, quelques secondes après au point A, au bas du plan incliné avec une vitesse de valeur $v_A = 5,8 \text{ m/s}$.



Données : $OA = \ell = 1,2 \text{ m}$; $\alpha = 50^\circ$; $g = 10 \text{ m/s}^2$; $m = 500 \text{ g}$; $R_N = 1,8 \text{ N}$.

- 1- Détermine :
 - 1.1- l'intensité de la force de frottement f , parallèle au plan AO et opposée au mouvement ;
 - 1.2- la valeur R de la réaction du plan.
- 2- Détermine :
 - 2.1- l'accélération a_x supposée constante du centre d'inertie G du solide ;
 - 2.2- la durée Δt du parcours OA.
- 3- Établis l'équation horaire du mouvement du solide, en prenant le point O comme origine des espaces et l'instant où le solide quitte ce point comme origine des dates.

7 Une bille de masse $m = 200 \text{ g}$, abandonnée sans vitesse initiale, se déplace suivant le profil ABC situé dans un plan verticalement contenant le point O.

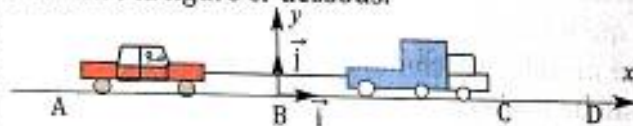
Sa position sur la portion circulaire AB est repérée par l'angle $\theta = (\widehat{MOB})$.

Données : $g = 9,8 \text{ m/s}^2$; $\theta_0 = (\widehat{AOB}) = 66^\circ$; $r = OB = 0,5 \text{ m}$; longueur $BC = L = 2,2 \text{ m}$.



- 1- Étude du mouvement sur la portion AB.
 - 1.1- Énonce le théorème de l'énergie cinétique.
 - 1.2- Détermine l'expression de la vitesse v_M de la bille lors de son passage en M en fonction de g , r , θ_0 et θ .
 - 1.3- Dédus la valeur de la vitesse v_B au point B.
- 2- On suppose que la bille s'immobilise exactement au point C du réceptacle.
 - 2.1- Détermine l'intensité f de la force de frottement $\vec{f}$ opposée au mouvement sur BC.
 - 2.2- Détermine l'expression a_x de l'accélération supposée constante de la bille en fonction de v_{Bx} et L puis en fonction de f et m .
 - 2.3- Fais l'application numérique en prenant $v_{Bx} = 2,4 \text{ m/s}$.

8 Un taxi-compteur en panne, est tracté, à partir de sa position de repos, par un camion de dépannage sur une voie horizontale ABCD comme le montre la figure ci-dessous.



Donnée : masse (taxi-compteur + Conducteur) : $m_T = 0,85 \text{ tonne}$.

- 1- Phase 1 : Les forces de frottement sont supposées négligeables.

On suppose que la force de traction du camion a une intensité constante de valeur $T = 4,2 \cdot 10^3 \text{ N}$ pendant une durée $\Delta t = 100 \text{ s}$.

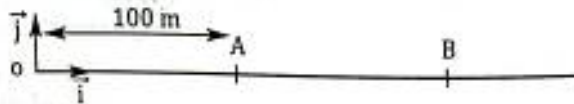
 - 1.1- Détermine l'accélération a_x du mouvement du taxi-compteur.
 - 1.2- Dédus la variation Δv_x de sa vitesse.

2- Phase 2 : Existence de forces de frottement A partir d'une zone très rugueuse (point B), le câble de traction se coupe. La vitesse du taxi-compteur passe de 72 km/h à 54 km/h sur un parcours de $L = 200$ m.

- 2.1- Détermine la valeur f des forces de frottement sur ce trajet.
- 2.2- Établis l'équation horaire du mouvement du taxi-compteur sur cette deuxième phase.

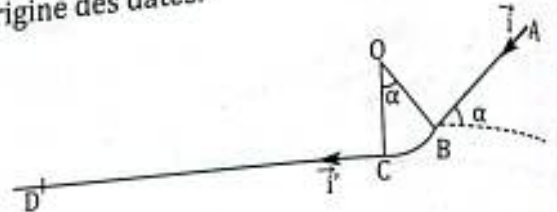
(On prend le passage en B comme origine des dates et des espaces).

9 Un avion amorce un décollage sur une piste rectiligne et horizontale. Il part du repos, du point A et atteint la vitesse de 180 km/h après avoir parcouru la distance $AB = 500$ m.



- 1- Détermine l'accélération a_x de l'avion.
- 2- Établis l'équation horaire du mouvement :
 - 2.1- en prenant le point O comme origine des espaces et l'instant de départ de A comme origine des dates ;
 - 2.2- en prenant le point A comme origine des espaces et le départ de A comme origine des dates.

10 Abandonné sans vitesse initiale au point A, un objet métallique de masse $m = 500$ g se déplace suivant le profil schématisé sous-dessous. Les forces de frottement sont présentes uniquement que sur les portions AB et CD. Elles équivalent à une force unique $\vec{f}$ d'intensité $f = 0,65$ N. La durée du trajet AB vaut $\Delta t = 0,43$ s. La boule s'arrête au point D. On prendra le point A comme origine des espaces et l'instant où la boule est abandonnée comme origine des dates.



Données :

$g = 10 \text{ m/s}^2$; $AB = L_1 = 0,75 \text{ m}$; $CD = L_2 = 1,2 \text{ m}$; $r = OB = OC = 0,5 \text{ m}$; $\alpha = 20^\circ$.

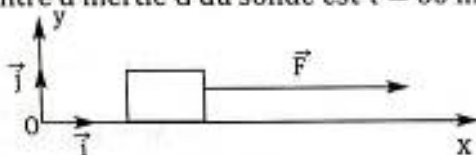
- 1- Fais le bilan des forces appliquées à la boule sur le trajet AB.
- 2- Détermine la vitesse de la boule au point B.
- 3- Établis l'équation horaire du mouvement sur la portion AB dans le repère $(A, \vec{i})$.
- 4- Détermine :
 - 4.1- la vitesse de la boule en C ;
 - 4.2- l'accélération a_{2x} du mouvement sur CD
 - 4.3- la durée du trajet CD.

Situations d'évaluation

11 Les élèves de terminale C étudient le mouvement d'un mobile de masse m afin de déterminer par deux méthodes, l'intensité des forces de frottement $\vec{f}$ qui lui sont appliquées (voir figure 1).

Le mobile, est soumis à une force motrice $\vec{F}$, de valeur $F = 0,65$ N sur un plan horizontal.

Le tableau ci-dessous donne l'exploitation de l'enregistrement obtenu. L'intervalle de temps régulier entre deux positions successives du centre d'inertie G du solide est $\tau = 60$ ms.



Dates (en ms)	$t_0 = 0$	$t_1 = 60$	$t_2 = 120$	$t_3 = 180$	$t_4 = 240$	$t_5 = 300$	$t_6 = 360$	t_7
Abscisse x (en cm)	0	0,9	2,2	3,8	5,8	8,1	10,8	13,8
Vitesse v (en m/s)								

Donnée : masse du mobile $m = 0,1$ kg.

- 1- Énonce le théorème de l'énergie cinétique.
- 2- Détermine :
 - 2.1- la relation entre l'accélération a_{1x} du mouvement, la masse m du mobile, l'intensité F de la force motrice et l'intensité f de la force de frottement.

2.2- la valeur théorique de f pour $a_{1x} = 0,99 \text{ m/s}^2$.

3- Complète la 3^{ème} ligne du tableau et construis la courbe montrant la variation de la vitesse du mobile en fonction du temps.

Échelles :

2 cm $\leftrightarrow$ 60 ms (en abscisse) ;

2 cm $\leftrightarrow$ 0,10 m/s (en ordonnée).

4- Détermine :

4.1- l'accélération a_{2x} expérimentale ;

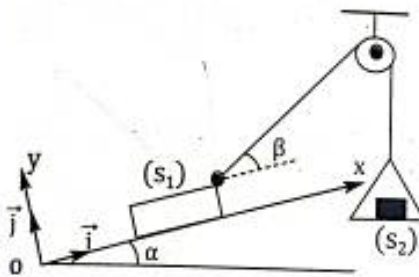
4.2- la valeur de la force $\vec{f}$.

Le club scientifique de ton établissement organise un concours de "génie en herbe" pour lequel ton professeur de Physique-Chimie t'a proposé pour représenter ta classe.

L'épreuve consiste à déterminer la masse m_2 du solide (S_2) qu'il faut déposer dans le plateau pour communiquer une accélération constante de valeur $a_x = 0,25 \text{ m/s}^2$ au solide (S_1).

Le schéma du dispositif à étudier est représenté sur la figure ci-dessous.

Tu es invité(e) pour présenter ta démarche et ton résultat.



Données : $g = 10 \text{ m/s}^2$; masse de S_1 ($m = 2 \text{ kg}$) ; $\alpha = 30^\circ$; $\beta = 35^\circ$.

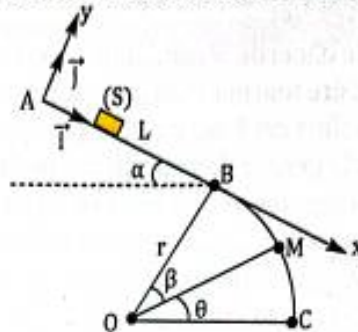
Intensité des forces de frottement sur S_1 : $f = 8 \text{ N}$.

On néglige la masse du plateau.

- Énonce le théorème du centre d'inertie.
- Fais le bilan des forces extérieures appliquées au solide (S_1) au cours de la montée.
- Représente-les sur un schéma clair.
- Détermine en supposant que la transmission du mouvement à travers le fil inextensible se fait sans frottement :
 - 4.1- la valeur de la tension $\vec{T}$ du fil ;
 - 4.2- la masse m_2 du solide (S_2).

Lors d'une séance de cours de renforcement, un professeur de Physique-Chimie apprend à un groupe d'élèves de la T^{le} E à déterminer l'angle limite à partir duquel un solide peut quitter la surface d'une glissière circulaire.

Le schéma du dispositif qui permet l'étude du mouvement du solide est donné ci-dessous.



Le solide (S) quitte le point A sans vitesse initiale à la date $t = 0 \text{ s}$.

Il aborde la partie circulaire BC avec la vitesse acquise en B.

Étant membre du groupe de travail, tu es sollicité(e) pour présenter ton résultat.

Données : $m = 100 \text{ g}$, $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, $r = 1,8 \text{ m}$;

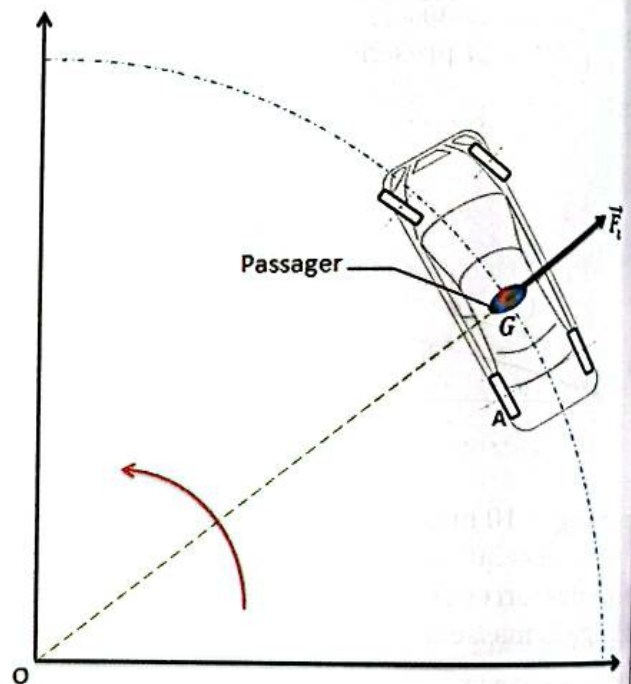
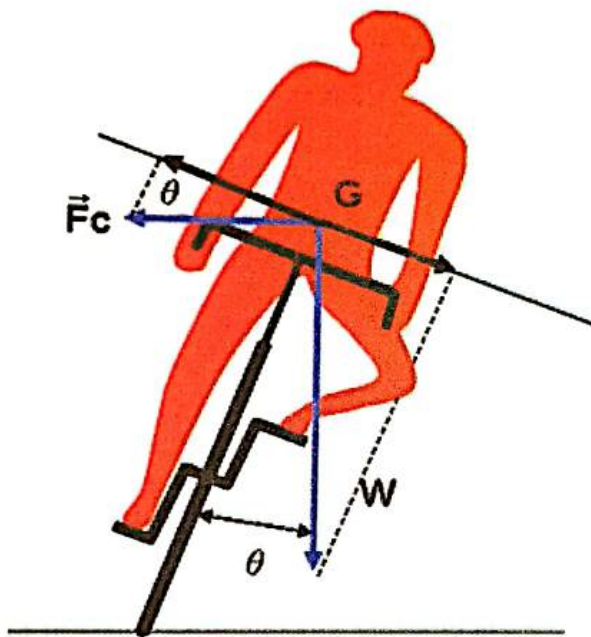
$L = 1 \text{ m}$; $\beta = (\overline{OC}, \overline{OB}) = 60^\circ$; $\alpha = 30^\circ$

On néglige tous les frottements.

- 1- Énonce le théorème du centre d'inertie.
- 2- Détermine la vitesse V_{Bx} du solide au point B.
- 3- Détermine :
 - 3.1- l'accélération a_x du solide sur le parcours AB ;
 - 3.2- la durée Δt du trajet AB ;
 - 3.3- l'équation horaire du mouvement du solide sur la portion AB ;
 - 3.4- l'expression de la vitesse au point M en fonction de m , g , θ , β et V_B ;
 - 3.5- l'expression de l'intensité de la réaction $\vec{R}$ de la glissière sur le solide au point M de la surface de contact en fonction de m , g , θ , r et V_M .
- 4- Montre qu'il existe un angle $\theta' = (\overline{OC}, \overline{ON})$ pour lequel le solide quitte la glissière en un point N.

VI- RENDEZ-VOUS DES CURIEUX

Le centre d'inertie d'un objet, ou centre de masse, est le point de l'espace où l'on applique les effets d'inertie, c'est-à-dire le vecteur variation de quantité de mouvement $\frac{d\vec{p}}{dt}$. Si la masse du système est constante, alors $\frac{d\vec{p}}{dt} = m\vec{a}$, $\vec{a}$ étant le vecteur accélération. C'est aussi le point où l'on applique le vecteur force d'inertie résultant de l'accélération d'entraînement dans le cas d'un référentiel non galiléen. Si l'on veut faire tourner l'objet autour d'un axe de direction donnée, alors l'axe pour lequel il faut fournir le moins d'effort est l'axe passant par le centre d'inertie. Si l'axe de rotation ne passe pas par le centre d'inertie, cela génère des vibrations dans le système. Dans un virage, les véhicules à quatre roues s'inclinent vers l'extérieur du virage ; les deux-roues doivent se pencher vers l'intérieur pour éviter la chute. Si un objet est posé sur le plancher du véhicule, toute accélération au sens large du terme (augmentation ou diminution de la vitesse, modification de la direction) peut provoquer sa chute. Pour décrire ces effets en rotation, il faut pouvoir définir un point d'application aux effets d'inertie. En statique, le principe fondamental de la dynamique en rotation s'exprime en général par rapport au centre de masse. Cet effet d'inertie est alors masqué puisque son moment par rapport à ce point est nul.



LEÇON

3

MOUVEMENTS DANS LES CHAMPS $\vec{g}$ ET $\vec{E}$ UNIFORMES

TABEAU DES HABILETÉS ET DES CONTENUS

HABILETÉS	CONTENUS
Définir	un champ uniforme.
Représenter	- le vecteur champ électrostatique uniforme. - le vecteur champ de pesanteur.
Déterminer	le vecteur-accelération dans : - le champ de pesanteur uniforme ; - un champ électrostatique uniforme.
Exploiter	- les équations horaires du mouvement. - l'équation cartésienne de la trajectoire. - les expressions de la : - flèche ; - portée ; - déviation angulaire ; - déflexion électrostatique.
Utiliser	- les équations horaires des mouvements. - l'équation cartésienne de la trajectoire.
Connaître	l'intérêt du champ électrostatique.

NOTIONS ESSENTIELLES

- Champ uniforme
- Vecteur champ de pesanteur uniforme
- Flèche
- Portée
- Vecteur champ électrostatique uniforme
- Déviation angulaire
- Déflexion électrostatique

SITUATION D'APPRENTISSAGE

Lors de la présentation d'un match de football à la télévision, le commentateur affirme que la balle a décrit une parabole. Un élève qui a suivi cette présentation avec ses camarades de classe, leur dit que la trajectoire parabolique est aussi décrite par les électrons dans un oscilloscope. De retour en classe, ils décident, sous la conduite leur professeur :

- d'établir dans le champ de pesanteur uniforme, l'équation de la trajectoire de la balle, les expressions de la flèche et de la portée ;
- d'établir dans un champ électrostatique uniforme, l'équation de la trajectoire d'un électron, les expressions de la déviation angulaire et de la déflexion électrostatique.

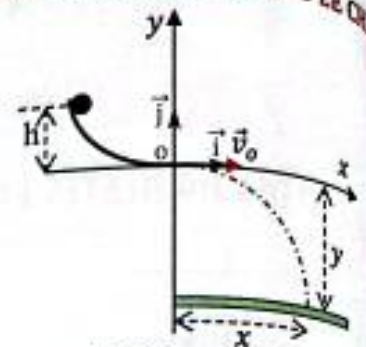


I- ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1 : FAIRE L'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DU MOUVEMENT D'UN PROJECTILE DANS LE CHAMP DE PESANTEUR UNIFORME

Soit l'expérience décrite ci-contre, représentée par le document 1.

Une bille est lâchée d'une hauteur h sans vitesse initiale. Elle arrive au point O avec un vecteur vitesse $\vec{v}_0$ horizontale, puis quitte ce point pour être réceptionnée sur une planche horizontale (receptacle). Pour une hauteur h fixée, tu fais varier l'ordonnée y du point d'impact de la bille en déplaçant la planche puis tu mesures son abscisse x . Tu obtiens les résultats suivants :



Document 1 : Schéma du dispositif d'étude d'un mouvement dans le champ de pesanteur

x (m)	0	0,075	0,15	0,225	0,3	0,375	0,45	0,525	0,6
$x^2 (10^{-4} \text{ m}^2)$									
y (m)	0	-0,012	-0,049	-0,110	-0,196	-0,306	-0,441	-0,60	-0,784

- Définis un champ uniforme.
- Calcule x^2 puis remplis la deuxième ligne du tableau ci-dessus.
- Trace la courbe $y = f(x^2)$. Échelles : 1 cm $\leftrightarrow$ 500 $\times 10^{-4} \text{ m}^2$ pour x^2 et 1 cm $\leftrightarrow$ 0,1 m pour y .
- Exprime y en fonction de x^2 à partir de l'allure de la courbe $y = f(x^2)$.
- Donne la nature de la trajectoire de la bille.

Je fais le point de l'activité

1- Définition d'un champ uniforme

Un champ uniforme est un domaine de l'espace dans lequel le vecteur champ caractéristique garde la même direction, le même sens et la même valeur en tout point de l'espace.

Exemples de champs uniformes :

- le champ de pesanteur en un lieu donné ;
- le champ électrostatique produit entre deux plaques métalliques, parallèles, chargées de signes contraires.

2- Remplissage du tableau et tracé de la courbe $y = f(x^2)$

x (m)	0	0,075	0,15	0,225	0,3	0,375	0,45	0,525	0,6
$x^2 (10^{-4} \text{ m}^2)$	0	56,25	225	506,25	900	1406,25	2025	2756,25	3600
y (m)	0	-0,012	-0,049	-0,110	-0,196	-0,306	-0,441	-0,60	-0,784

3- Équation de la courbe $y = f(x^2)$

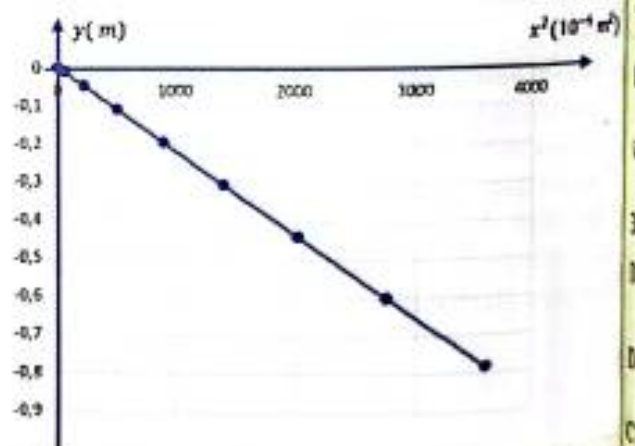
La courbe obtenue est une droite ($y = kx^2$) passant par l'origine, de pente

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta(x^2)} = \frac{(-0,784 - 0)}{(3600 - 0) \times 10^{-4}} = -2,18 \text{ m.s}^{-2}$$

4- Nature de la trajectoire

L'expression de y est : $y = -2,18 x^2$.

y étant du second degré par rapport à x , la trajectoire du mouvement de la bille est une parabole.



J'évalue mes acquis



Un solide est lancé dans le champ de pesanteur uniforme avec un vecteur vitesse $\vec{v}_0$ de direction horizontale.

La trajectoire du solide dans le champ de pesanteur est :

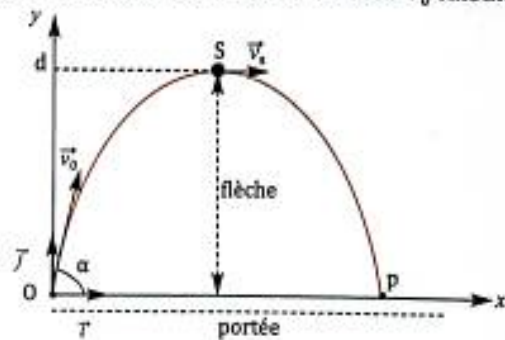
- a) une droite ;
- b) un cercle ;
- c) une parabole.

Recopie la lettre de la bonne option.

ACTIVITÉ 2 : ÉTABLIR LES ÉQUATIONS HORAIRES ET L'ÉQUATION CARTÉSIENNE DE LA TRAJECTOIRE DU MOUVEMENT D'UN PROJECTILE DANS LE CHAMP DE PESANTEUR UNIFORME

Exploite le document ci-dessous dans lequel un projectile est lancé avec le vecteur vitesse $\vec{v}_0$ faisant un angle α avec l'horizontale.

- Établis l'expression du vecteur accélération du projectile en te servant du théorème du centre d'inertie.
- Établis les équations horaires du mouvement du projectile, dans le repère $(Ox; Oy)$ associé au référentiel galiléen.
- Déduis l'équation cartésienne de la trajectoire $y = f(x)$.



Document 2 : Trajectoire d'un projectile dans le champ de pesanteur

Je fais le point de l'activité

1- Expression du vecteur accélération

Le système en mouvement dans le référentiel terrestre supposé galiléen est le projectile.

Bilan des forces extérieures appliquées au système : le poids $\vec{P} = m\vec{g}$ du projectile.

Appliquons le théorème du centre d'inertie : $\Sigma \vec{F}_{\text{ext}} = m\vec{a}$; $\vec{P} = m\vec{g} = m\vec{a}$.

Le vecteur accélération est donc : $\vec{a} = \vec{g}$.

2- Équations horaires du mouvement

À partir du vecteur accélération, on exprime le vecteur vitesse et le vecteur position :

$$\vec{v} = \vec{a}t + \vec{v}_0 \text{ et } \vec{OM} = \frac{1}{2}\vec{a}t^2 + \vec{v}_0t + \vec{OM}_0.$$

$\vec{v}_0$ et $\vec{OM}_0$ sont le vecteur vitesse et le vecteur position à la date $t = 0$ s.

Projections dans le repère $(Ox; Oy)$:

Conditions initiales (à $t = 0$ s)

$$\vec{a} \begin{cases} a_x = g_x = 0 \\ a_y = g_y = -g \end{cases} ; \vec{v}_0 \begin{cases} v_{0x} = v_0 \cos \alpha \\ v_{0y} = v_0 \sin \alpha \end{cases} ; \vec{OM}_0 \begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = 0 \end{cases}.$$

Pour un instant t quelconque :

$$\vec{v} \begin{cases} v_x = a_x t + v_{0x} = v_0 \cos \alpha \\ v_y = a_y t + v_{0y} = -gt + v_0 \sin \alpha \end{cases} ; \vec{OM} \begin{cases} x = \frac{1}{2}a_x t^2 + v_{0x}t + x_0 = v_0 t \cos \alpha \\ y = \frac{1}{2}a_y t^2 + v_{0y}t + y_0 = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0 t \sin \alpha \end{cases}$$

3- Équation cartésienne de la trajectoire

De l'équation $x = v_0 t (\cos \alpha)$, exprimons t en fonction de x ; $t = \frac{x}{v_0 \cos \alpha}$

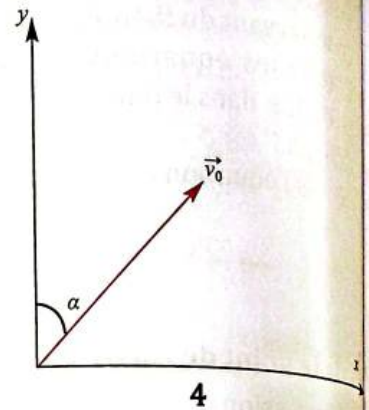
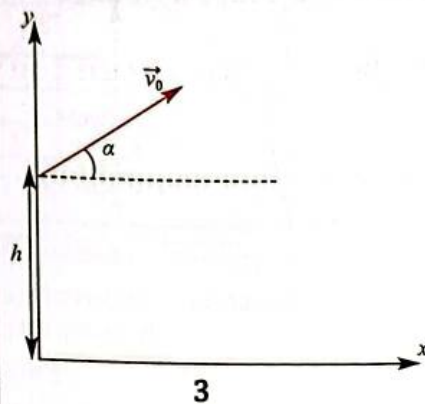
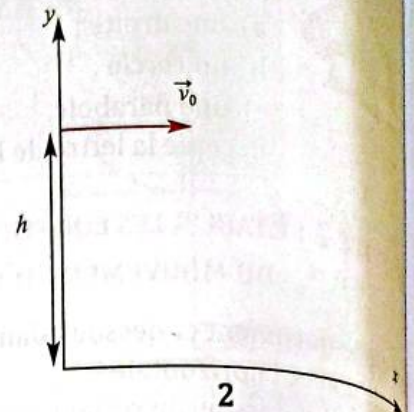
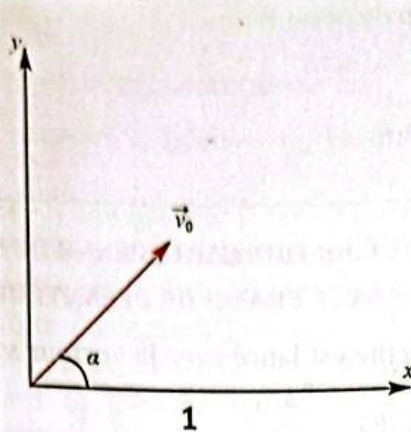
$$\text{Donc } y(x) = -\frac{1}{2}g \left(\frac{x}{v_0 \cos \alpha} \right)^2 + v_0 \left(\frac{x}{v_0 \cos \alpha} \right) \sin \alpha ; y(x) = -\frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} + x \tan \alpha$$

C'est l'équation d'une parabole à concavité tournée vers le bas.

J'évalue mes acquis



Un projectile est lancé avec une vitesse $\vec{v}_0$. On donne les différents cas de figure ci-dessous.



Associe le numéro de chaque cas de figure du diagramme A à l'équation de trajectoire dans le diagramme B.

A	
1	•
2	•
3	•
4	•

B	
•	$y(x) = -\frac{gx^2}{2v_0^2} + h$
•	$y(x) = -\frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} + x \tan \alpha + h$
•	$y(x) = -\frac{gx^2}{2v_0^2 \sin^2 \alpha} + \frac{x}{\tan \alpha}$
•	$y(x) = -\frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} + x \tan \alpha$

ACTIVITÉ 3 : ÉTABLIR LES EXPRESSIONS DE LA FLÈCHE ET DE LA PORTÉE

Sers-toi des équations horaires et de l'équation cartésienne de la trajectoire de l'activité 2.

- 1- Détermine le temps mis par le projectile pour atteindre le sommet S.
- 2- Établis l'expression de la hauteur maximale atteinte par le solide, appelée flèche.
- 3- Établis l'expression de la portée.

Je fais le point de l'activité**1- Temps mis par le projectile pour atteindre le sommet S**

Au sommet S de la trajectoire, le vecteur vitesse $\vec{v}_s$ est horizontal, de coordonnées

$$(v_{sx} = v_0 \cos \alpha ; v_{sy} = 0).$$

$$v_{sy} = -gt_s + v_0 \sin \alpha = 0 \Rightarrow t_s = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}$$

2- Expression de la flèche : ordonnée y_s du sommet S

$$y_s = -\frac{1}{2}gt_s^2 + v_0 t_s \sin \alpha = -\frac{1}{2}g\left(\frac{v_0 \sin \alpha}{g}\right)^2 + v_0\left(\frac{v_0 \sin \alpha}{g}\right)\sin \alpha = -\left(\frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}\right) + \left(\frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{g}\right).$$

$$\text{Finalement } y_s = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$$

Le point S au sommet de la trajectoire a pour abscisse :

$$x_s = v_0 t_s \cos \alpha = v_0 \left(\frac{v_0 \sin \alpha}{g}\right) \cos \alpha ; x_s = \left(\frac{v_0^2 \sin \alpha \cos \alpha}{g}\right) ; x_s = \frac{v_0^2 \sin(2\alpha)}{2g}$$

3- Expression de la portée : abscisse du point P intersection de la courbe et l'axe Ox

Au point P, l'ordonnée y_p est nulle.

$$y_p = -\frac{1}{2}gt_p^2 + v_0 t_p \sin \alpha = 0. \text{ Ce qui donne : } t_p \left(-\frac{1}{2}gt_p + v_0 \sin \alpha\right) = 0. t_p = 0 \text{ à l'origine du repère d'espace}$$

D'où $t_p = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}$. En remplaçant t_p dans l'expression de x , on obtient :

$$x_p = v_0 \cos \alpha \times \frac{2v_0 \sin \alpha}{g} = \frac{2v_0^2 \sin \alpha \cos \alpha}{g}$$

$$\text{Finalement, } x_p = \frac{v_0^2 \sin(2\alpha)}{g}.$$

Dans le cas précis du document 2, on peut aussi dire que $x_p = 2x_s = \frac{v_0^2 \sin(2\alpha)}{g}$ car la courbe est symétrique par rapport à un axe vertical passant par S.

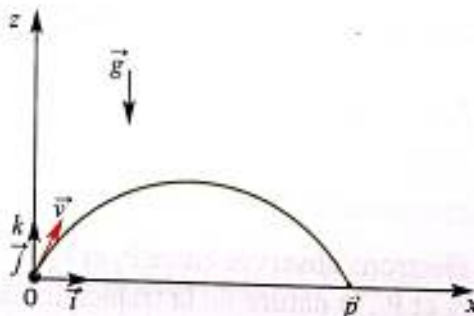
Remarque

v_0 et g étant fixées, la portée est maximale si $\sin(2\alpha) = 1$ soit $2\alpha = 90^\circ \rightarrow \alpha = 45^\circ$

$$x_{p\max} = \frac{v_0^2}{g}.$$

Évalue mes acquis

Un projectile, lancé avec le vecteur vitesse initiale $\vec{v}_0$ de valeur $v_0 = 16 \text{ m.s}^{-1}$, retombe sur l'axe Ox en un point P d'abscisse $x_p = 14 \text{ m}$.
Détermine les angles, α_1 et α_2 que fait $\vec{v}_0$ avec l'axe Ox, permettant d'atteindre le point P.



ACTIVITÉ 4 : ÉTUDIER EXPÉRIMENTALEMENT LE MOUVEMENT D'UNE PARTICULE CHARGÉE DANS UN CHAMP ÉLECTROSTATIQUE UNIFORME

Le document ci-contre montre le mouvement d'un électron dans un tube.

La trace en bleu, sur le schéma, représente la trajectoire des électrons entre la cathode C et l'anode A, puis entre deux plaques métalliques horizontales, chargées P_1 et P_2 d'un condensateur plan.

L'électron est émis, sans vitesse initiale, par la cathode. Une tension, appliquée entre la cathode et l'anode, permet de l'accélérer. Entre les plaques P_1 et P_2 , l'électron subit une déviation et arrive enfin sur un écran en un point I.

- 1- Représente sur un schéma :
 - 1.1- le vecteur champ électrostatique $\vec{E}$ et la force électrostatique $\vec{f}_e$ entre C et A ;
 - 1.2- le vecteur champ électrostatique $\vec{E}$ et la force électrostatique $\vec{F}$ entre P_1 et P_2 .
- 2- Établis l'expression de la vitesse v_0 de l'électron à son arrivée au point O à l'entrée des plaques P_1 et P_2 .
- 3- Donne la nature de la trajectoire des électrons entre P_1 et P_2 .



Document 3 : Trajectoire d'une particule chargée dans un champ électrostatique uniforme.

Je fais le point de l'activité

- 1- Représentation du champ électrostatique $\vec{E}$ et de la force électrostatique $\vec{f}_e$

- Entre la cathode C et l'anode A

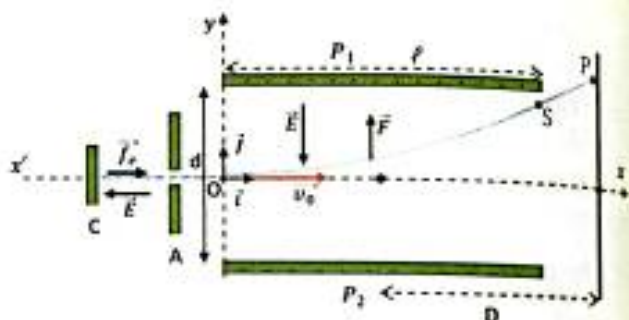
La cathode C est chargée négativement et l'anode A est chargée positivement. On sait aussi que $\vec{E}$ décroît les potentiels, donc dirigé de A vers C.

L'électron de charge $q = -e$ et de masse m , dans le référentiel du laboratoire, supposé galiléen, est soumis à la force électrique : $\vec{f}_e = q\vec{E}$.

$q < 0$, donc $\vec{f}_e$ et $\vec{E}$ sont de sens opposés.

- Entre les plaques P_1 et P_2

L'électron, chargé négativement, se dirige vers la plaque P_1 . P_1 est donc chargée positivement et P_2 chargée négativement. Entre les plaques P_1 et P_2 , le champ électrostatique $\vec{E}$ est orienté vers P_2 et la force électrostatique $\vec{F}$ orientée vers P_1 .



- 2- Expression de la vitesse v_0 de l'électron à son arrivée au point O à l'entrée des plaques P_1 et P_2

D'après le théorème de l'énergie cinétique $\Delta E_c = \sum W(\vec{f}_{ext})$

$$\frac{1}{2}mv_0^2 - 0 = -e(V_C - V_A) = eU_{AC}$$

$$v_0 = \sqrt{\frac{2eU_{AC}}{m}}$$

- 4- Trajectoire des électrons observée entre P_1 et P_2

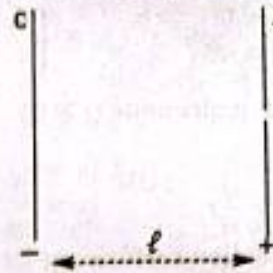
Entre les plaques P_1 et P_2 , la nature de la trajectoire des électrons est une parabole. Son équation cartésienne sera établie dans l'activité suivante.

J'évalue mes acquis



Détermine la vitesse v_0 d'un électron à la sortie d'un condensateur plan au point O (voir schéma ci-dessous).

Données : $U_{AC} = 200 \text{ V}$; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, $\ell = 2 \text{ cm}$.



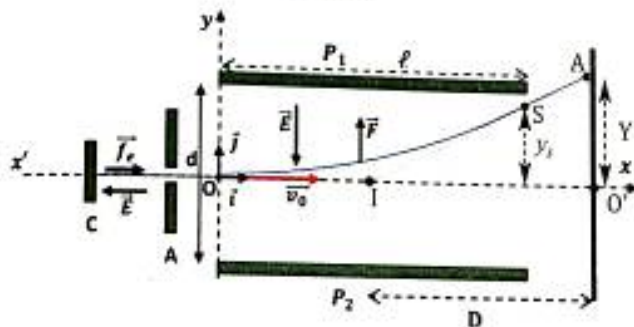
ACTIVITÉ 5 : ÉTABLIR LES ÉQUATIONS HORAIRES ET L'ÉQUATION CARTÉSIENNE DE LA TRAJECTOIRE D'UNE PARTICULE DANS UN CHAMP ÉLECTROSTATIQUE UNIFORME

Reprends l'expérience du document 3.

- 1- Détermine le vecteur accélération de l'électron dans le champ électrostatique uniforme entre les plaques P_1 et P_2 .
- 2- Établis les équations horaires du mouvement de la particule dans le repère $(Ox ; Oy)$ associé au référentiel galiléen.
- 3- Dédus l'équation cartésienne de la trajectoire $y = f(x)$.
- 4- Établis l'expression de la déviation angulaire.
- 5- Établis l'expression de la déviation de la trajectoire.
- 6- Nomme cette déviation.

Je fais le point de l'activité

1- Vecteur accélération de l'électron



Le système, l'électron, en mouvement dans le référentiel du laboratoire supposé galiléen, est soumis à la force électrostatique $\vec{F} = q\vec{E} = -e\vec{E}$. Son poids $\vec{P}$ est négligeable devant $\vec{F}$.

Théorème du centre d'inertie : $\Sigma(\vec{f}_{ext}) = m\vec{a}$ donc : $\vec{F} = -e\vec{E} = m\vec{a}$.

On en déduit le vecteur accélération : $\vec{a} = -\frac{e\vec{E}}{m}$

2- Équations horaires de l'électron

À partir du vecteur accélération, on obtient :

- le vecteur vitesse $\vec{v} = \vec{a}t + \vec{v}_0$ et ;
- le vecteur position $\vec{OM} = \frac{1}{2}\vec{a}t^2 + \vec{v}_0t + \vec{OM}_0$, où $\vec{v}_0$ et $\vec{OM}_0$ sont respectivement le vecteur vitesse et le vecteur position à la date $t = 0$.

Projections dans le repère $(Ox; Oy)$ Conditions initiales (à $t = 0$)

$$\vec{E} \begin{cases} E_x = 0 \\ E_y = -E \end{cases} ; \vec{a} \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = \frac{e}{m} E \end{cases} ; \vec{v}_0 \begin{cases} v_{0x} = v_0 \\ v_{0y} = 0 \end{cases} ; \vec{OM}_0 \begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = 0 \end{cases}$$

Pour t quelconque ($t \geq 0$)

$$\vec{v} \begin{cases} v_x = v_0 \\ v_y = \frac{eE}{m} t \end{cases} ; \vec{OM} \begin{cases} x = v_0 t \\ y = \frac{eE}{2m} t^2 \end{cases}$$

3- Équation cartésienne de la trajectoire de l'électron

De l'équation $x = v_0 t$, on obtient : $t = \frac{x}{v_0}$ donc $y(x) = \frac{eE}{2m} \left(\frac{x}{v_0} \right)^2$; $y(x) = \frac{eE}{2mv_0^2} x^2$

4- La déviation angulaire α

$$\tan \alpha = \frac{y_s}{\frac{\ell}{2}} = \frac{eE\ell}{2mv_0^2}$$

5- Détermination de la déflexion électrique (déviation linéaire sur l'écran)

La déflexion électrique est la distance $Y = O'A$. A est le point d'impact de l'électron dévié sur l'écran.

$$\tan \alpha = \frac{O'A}{D}, \text{ d'où } Y = O'A = D \tan \alpha = \frac{DeE\ell}{2mv_0^2}$$

J'évalue mes acquis



1- Retrouve l'expression de la déviation angulaire, en utilisant la relation

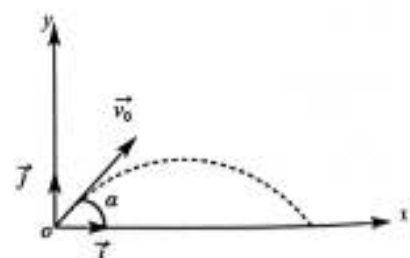
$$\tan \alpha = \frac{dy}{dx} \Big|_{x=\ell}, \text{ dans l'activité précédente.}$$

2- Calcule sa valeur pour $v_0 = 2,11 \cdot 10^7$ m/s ; $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg ; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C ; $\ell = 10$ cm ; $E = 4000$ V/m.

II- RÉSUMÉ DE COURS

Un champ uniforme est un champ dans lequel le vecteur champ possède une direction, un sens et un module constants en tout point. Le champ de pesanteur uniforme et le champ électrostatique uniforme en sont des exemples.

On étudie dans ces champs, les équations horaires et les équations cartésiennes des trajectoires. Exemple dans le champ de pesanteur uniforme.



Équations horaires

$$\vec{v} \begin{cases} v_x = v_0 \cos \alpha \\ v_y = -gt + v_0 \sin \alpha \end{cases}$$

$$\vec{OM} \begin{cases} x = v_0 t \cos \alpha \\ y = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0 t \sin \alpha \end{cases}$$

Équation cartésienne de la trajectoire

$$y = -\frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} + x \tan \alpha$$

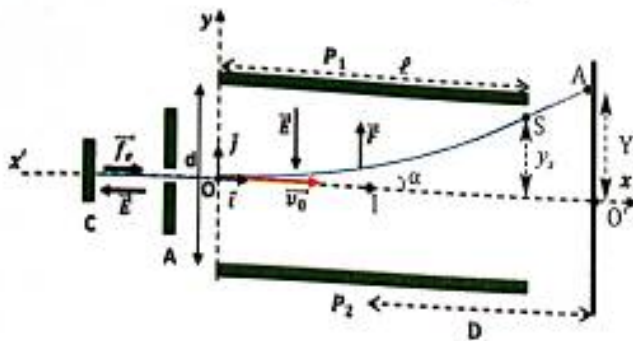
Expression de la flèche

$$y_s = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$$

Expression de la portée

$$x_p = \frac{v_0^2 \sin(2\alpha)}{g}$$

Exemple dans un champ électrostatique uniforme



Équations horaires

$$\vec{v} \begin{cases} v_x = v_0 \\ v_y = \frac{eE}{m}t \end{cases} ; \quad \vec{OM} \begin{cases} x = v_0 t \\ y = \frac{eEt^2}{2m} \end{cases}$$

Équation cartésienne de la trajectoire

$$y = \frac{eE}{2mv_0^2} x^2$$

Déviation linéaire

$$\tan \alpha = \frac{eE\ell}{mv_0^2}$$

Déflexion électrostatique

$$y = \frac{DeE\ell}{2mv_0^2}$$

III- MÉTHODES

- Pour déterminer les équations horaires, il faut :
 - écrire l'expression du vecteur accélération $\vec{a}$ en appliquant le théorème du centre d'inertie ;
 - écrire les vecteurs-vitesses et position en fonction de t :

$$\vec{v} = \vec{a}t + \vec{v}_0 \text{ et } \vec{OM} = \frac{1}{2}\vec{a}t^2 + \vec{v}_0t + \vec{OM}_0.$$

- projeter les vecteurs-vitesses et positions dans le repère $(Ox ; Oy)$ choisi.
- Pour déterminer l'équation de la trajectoire, il faut exprimer t en fonction de x puis le remplacer dans l'expression de y .
- Pour déterminer la flèche et la portée, il faut exprimer le temps t_s mis pour atteindre le sommet, la composante horizontale du vecteur-vitesse est nulle, puis exprimer $x(t_s)$, $y(t_s)$ et $x_p = 2x(t_s)$.

On peut aussi utiliser $\frac{dy}{dx}(t=t_s) = 0$ pour exprimer x_s , $y(x_s)$ et $x_p = 2x_s$.

Pour la portée, on peut résoudre l'équation $y = 0$.

IV- EXERCICES RÉSOLUS

Exercice 1

Un solide est lancé avec un vecteur vitesse $\vec{v}_0$ faisant un angle α avec l'horizontale.

- 1- Établis les équations horaires $x(t)$ et $y(t)$ du mouvement du centre d'inertie G du solide dans le repère $(Ox ; Oy)$.
- 2- Établis l'équation cartésienne de la trajectoire $y(x)$.



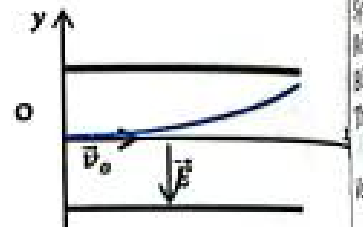
Exercice 2

Un solide est lancé avec une vitesse $\vec{v}_0$ dans une direction faisant un angle $\alpha_1 = 35^\circ$ avec l'horizontale. Il retombe en un point P de l'axe (Ox) . Le solide est relancé, avec une vitesse $\vec{v}'_0 = v_0$, dans une direction faisant un nouvel angle α_2 avec l'horizontale. Il retombe au même point P. Détermine l'angle α_2 .

Exercice 3

Des électrons pénètrent avec une vitesse $\vec{v}_0$ entre deux plaques chargées de signes contraires.

- 1- Établis les équations horaires $x(t)$ et $y(t)$ du mouvement des électrons dans le repère $(Ox ; Oy)$.
- 2- Établis l'équation cartésienne de la trajectoire.



Résolution de l'exercice 1

1- Équations horaires

Système : le solide

Référentiel d'étude : terrestre supposé galiléen

Bilan des forces : le poids $\vec{P} = m\vec{g}$

Théorème du centre d'inertie : $\vec{P} = m\vec{a} = m\vec{g}$ donc le vecteur accélération est : $\vec{a} = \vec{g}$

Le vecteur-vitesse : $\vec{v} = \vec{g}t + \vec{v}_0$ et le vecteur-position $\vec{OM} = \frac{1}{2}\vec{g}t^2 + \vec{v}_0t + \vec{OM}_0$

Projections dans le repère $(Ox ; Oy)$

$$\text{À } t = 0 : \vec{a} \begin{cases} a_x = g_x = 0 \\ a_y = g_y = -g \end{cases} ; \vec{v}_0 \begin{cases} v_{0x} = v_0 \cos \alpha \\ v_{0y} = v_0 \sin \alpha \end{cases} ; \vec{OM}_0 \begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = 0 \end{cases}$$

À t quelconque $\vec{OM} \begin{cases} x = (v_0 \cos \alpha) t \\ y = -\frac{1}{2} g t^2 + (v_0 \sin \alpha) t \end{cases}$

2- Équation cartésienne de la trajectoire

De $x = (v_0 \cos \alpha) t$, on obtient : $t = \frac{x}{v_0 \cos \alpha}$

En remplaçant t dans l'expression de y , on a : $y = -\frac{1}{2} g \left(\frac{x}{v_0 \cos \alpha} \right)^2 + (v_0 \sin \alpha) \left(\frac{x}{v_0 \cos \alpha} \right)$

Donc $y = -\frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} x^2 + x \tan \alpha$

Commentaire :

Voir la rubrique méthode.

Résolution de l'exercice 2

L'expression de la portée est : $x_p = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$ donc $\sin(2\alpha) = \frac{g x_p}{v_0^2}$

$\sin(2\alpha) = \frac{g x_p}{v_0^2}$ admet deux solutions $2\alpha_1$ et $2\alpha_2 = 180 - 2\alpha_1$ soit $\alpha_2 = 90 - \alpha_1$.

$\alpha_2 = 90 - \alpha_1 = 55^\circ$

Commentaire :

Voir le cours.

Résolution de l'exercice 3

1- Équations horaires

Système : l'électron

Référentiel du laboratoire supposé galiléen

Bilan des forces : la force électrostatique $\vec{F}_e = q\vec{E}$

Théorème du centre d'inertie : $\vec{F}_e = m\vec{a} = q\vec{E}$

Vecteur accélération : $\vec{a} = \frac{q\vec{E}}{m} = -\frac{e\vec{E}}{m}$; vecteur vitesse : $\vec{v} = \vec{a}t + \vec{v}_0$;

vecteur position $\vec{OM} = \frac{1}{2} \vec{a}t^2 + \vec{v}_0 t + \vec{OM}_0$

À $t = 0$: $\vec{E} \begin{cases} E_x = 0 \\ E_y = -E \end{cases}$; $\vec{a} \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = \frac{eE}{m} \end{cases}$; $\vec{v}_0 \begin{cases} v_{0x} = v_0 \\ v_{0y} = 0 \end{cases}$; $\vec{OM}_0 \begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = 0 \end{cases}$

À t quelconque : $\vec{OM} \begin{cases} x = v_0 t \\ y = \frac{1}{2} \frac{eE}{m} t^2 \end{cases}$

2- Équation cartésienne de la trajectoire

De $x = v_0 t$, on a : $t = \frac{x}{v_0}$

En remplaçant t dans l'expression de y , on obtient : $y = \frac{1}{2} \frac{eE}{m} \left(\frac{x}{v_0} \right)^2$ donc $y = \frac{eE}{2mv_0^2} x^2$

Commentaire :

Voir le cours.

V- JE M'EXERCE

Dans tous les exercices, prends $g = 10 \text{ m/s}^2$

Exercices de fixation/ Application

1 Ordonne les mots et groupes de mots ci-dessous de façon à former une phrase correcte en rapport avec le mouvement dans le champ de pesanteur. / faisant un angle α / une parabole. / de pesanteur / lancé / uniforme, / dans une direction / décrit / Dans le champ / un objet, / avec l'horizontale, /

2 Un projectile est lancé de l'origine O avec un vecteur vitesse $\vec{v}_0$ dans une direction faisant un angle α avec l'axe horizontal Ox.

1- L'expression de la portée est :

a) $x_p = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{g}$; b) $x_p = \frac{v_0^2 \sin(2\alpha)}{g}$;
c) $x_p = \frac{v_0 \sin(2\alpha)}{g}$.

2- L'expression de la flèche est :

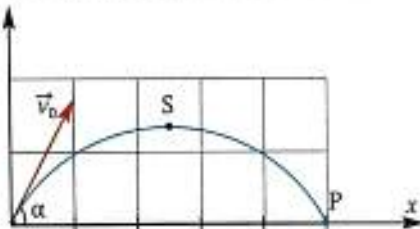
a) $y_s = \frac{v_0^2 \cos^2 \alpha}{2g}$; b) $y_s = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{g}$;
c) $y_s = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$.

3- L'expression de la portée maximale est :

a) $x_{p\max} = \frac{v_0^2}{g}$; b) $x_{p\max} = \frac{v_0^2}{2g}$; c) $x_{p\max} = \frac{2v_0^2}{g}$.

Écris, pour chacune des propositions, le numéro suivi de la lettre correspondant à la bonne réponse.

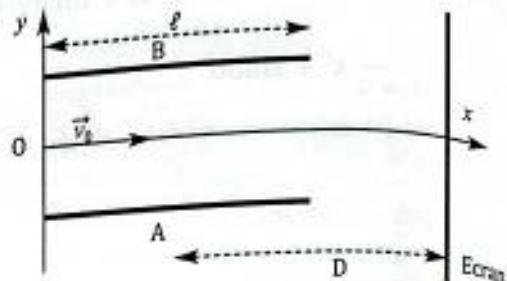
3 Un projectile est lancé à la date $t = 0 \text{ s}$ avec une vitesse $\vec{v}_0$.



1 carreau $\rightarrow 5 \text{ m/s}$; $\alpha = 50^\circ$

- Détermine graphiquement la valeur de v_{0x} de la vitesse suivant l'axe des x.
- Calcule la valeur v_0 de la vitesse.
- Calcule les valeurs de la flèche et de la portée.
- Reproduis le dessin, puis représente les vecteurs vitesses $\vec{v}_S$ et $\vec{v}_P$ aux points S et P.

4 Une particule de masse m, de charge $q > 0$, pénètre avec un vecteur vitesse $\vec{v}_0$ dans un champ électrique uniforme.



1- L'équation cartésienne de la trajectoire de la particule est :

a) $y = \frac{qEx^2}{2mv_0^2}$; b) $y = \frac{qEx^2}{mv_0^2}$; c) $y = \frac{2qEx^2}{mv_0^2}$

2- La déviation angulaire est :

a) $\tan \alpha = \frac{2qE\ell}{mv_0^2}$; b) $\tan \alpha = \frac{qE\ell}{2mv_0^2}$; c) $\tan \alpha = \frac{qE\ell}{mv_0^2}$

3- La déflexion électrique a pour expression :

a) $Y = \frac{DE\ell}{mv_0^2}$; b) $Y = \frac{DqE\ell}{2mv_0^2}$; c) $Y = \frac{DqE\ell}{mv_0^2}$

Écris, pour chacune des propositions, le numéro suivi de la lettre correspondant à la bonne réponse.

5 Recopie et complète le texte ci-dessous par les mots et groupes de mots qui conviennent : l'angle de déviation - point de sortie - chargée - tangente à la trajectoire - angulaire - parabole

Une particule pénètre dans un champ électrique uniforme. La particule ... en mouvement subit une déviation ... Sa ... est une La déviation ... est ... fait la ... à la trajectoire au ... avec Ox.

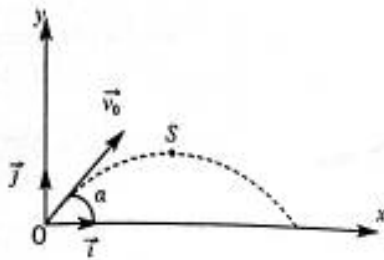
6 Un projectile lancé dans le champ de pesanteur avec une vitesse faisant un angle α avec l'horizontale

- Le mouvement du projectile dépend de la masse.
 - La portée maximale s'obtient avec un angle de tir de 45° .
 - Il existe toujours deux angles de tirs différents pour atteindre un point P de l'axe horizontal.
- Réponds, pour chacune des affirmations, par (V) si l'affirmation est vraie ou par faux (F) si elle est fausse.

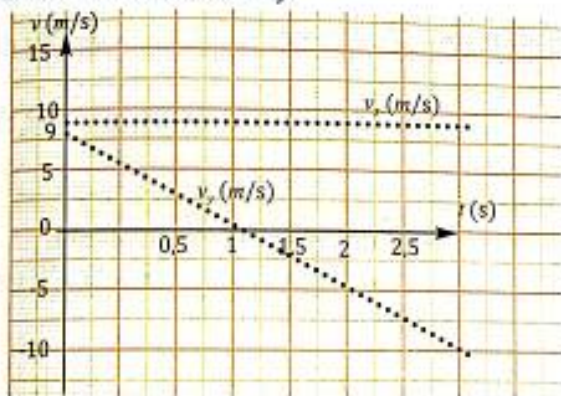
Exercices de renforcement / Approfondissement

7 Un dispositif permet de lancer une balle de tennis à la vitesse $v_0 = 16 \text{ m/s}$. Le centre d'inertie G de la balle part du point O vers le haut suivant une direction faisant un angle $\alpha = 40^\circ$ avec l'horizontale.

- Établis les équations horaires du mouvement.
- Établis l'équation cartésienne de la trajectoire.
- Détermine :
 - la flèche ;
 - la portée.



8 Un projectile est lancé, à la date $t = 0 \text{ s}$, d'un point de coordonnées $x_0 = 0 \text{ m}$; $y_0 = 2 \text{ m}$, avec un vecteur vitesse $\vec{v}_0$ incliné d'un angle α sur l'horizontale. La figure ci-dessous donne les représentations graphiques des vitesses v_x et v_y suivant les axes Ox et Oy .



- Donne la valeur de v_{0x} , puis écris l'équation horaire $x(t)$.
- Sur l'axe (Oy) , montre que $v_y = -10t + 9$, puis écris l'équation horaire $y(t)$.
- Écris l'équation cartésienne de la trajectoire $y(x)$.

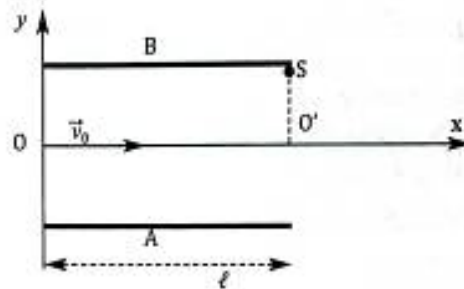
9 Un faisceau de protons pénètre en O , avec un vecteur vitesse $\vec{v}_0$, entre deux armatures A et B planes, horizontales, distantes de d et de longueur ℓ . Une tension U_{AB} crée, entre A et B , un champ électrostatique $\vec{E}$. Les protons traversent cette région pour en sortir au point S .

Données : $\ell = 0,2 \text{ m}$; $d = 0,05 \text{ m}$; masse et charge

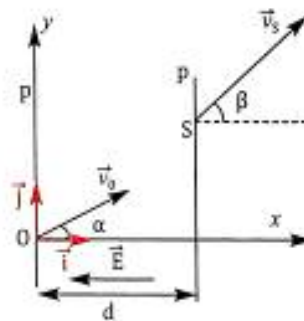
du proton : $m = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$;

$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $U_{AB} = 500 \text{ V}$; $v_0 = 10^6 \text{ m/s}$.

- Établis les équations horaires $x(t)$ et $y(t)$ du mouvement des protons dans le repère $(Ox; Oy)$.
- Établis l'équation cartésienne $y(x)$ de la trajectoire des protons dans le repère $(Ox; Oy)$.
- Détermine l'ordonnée y_s du point de sortie S . Les protons peuvent-ils sortir, sans heurter l'une des armatures ?



10 Une particule de charge positive $q = e$, de masse m pénètre à $t = 0 \text{ s}$, au point O , dans l'espace limité par deux plaques P_1 et P_2 constituées de fins grillages métalliques. Entre ces plaques, règne un champ électrostatique uniforme $\vec{E}$. La particule sort du champ par le point S .



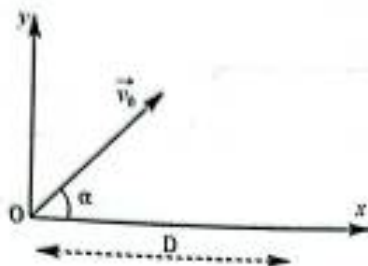
- Établis les équations horaires du mouvement.
- Établis l'équation de la trajectoire de la particule $x = f(y)$.
- Montre que $v_x^2 = \frac{-2qEx}{m} + v_0^2 \cos^2 \alpha$, puis calcule v_x .
- Calcule l'angle de sortie β .

Données : $v_0 = 2 \cdot 10^7 \text{ m.s}^{-1}$;

$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$; $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$;

$E = 5 \cdot 10^4 \text{ V/m}$; $d = 0,01 \text{ m}$; $\alpha = 10^\circ$.

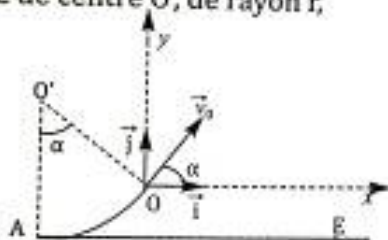
- 11** Un golfeur frappe une balle ponctuelle au point O à la date $t = 0$ s. La balle part avec un vecteur vitesse $\vec{v}_0$ faisant un angle $\alpha = 35^\circ$ avec l'horizontale.
- Établis l'équation de la trajectoire de la balle.
 - Détermine la vitesse initiale v_0 de la balle pour qu'elle atteigne en un coup le trou situé à $D = 153$ m de la position initiale de la balle.
 - Détermine, en admettant que la vitesse initiale de la balle soit de 40 m/s, la durée Δt de vol de la balle jusqu'à son entrée dans le trou.



- 12** Un projectile est lancé dans une direction faisant un angle α avec l'horizontale. L'équation cartésienne

Situations d'évaluation

- 13** Ton groupe de travail réalise une expérience représentée sur le dessin ci-dessous. Un solide ponctuel, de masse m , peut se déplacer sans frottement sur une piste en forme d'un arc de cercle de centre O' , de rayon r ,



tel que $(\vec{OA}, \vec{OO'}) = \alpha$.

Le solide est lancé du point A avec la vitesse $\vec{v}$, il se déplace et parvient au point O avec la vitesse $\vec{v}_0$ de module v_0 . Il quitte la piste en O et retombe au sol au point E situé sur le plan horizontal contenant A. Ton groupe doit déterminer la vitesse au point A, les coordonnées du point E et la vitesse du solide à l'arrivée en ce point. Tu es chargé(e) du compte-rendu.

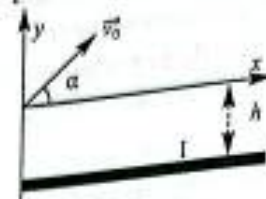
Données : $m = 500$ g ; $r = 1$ m ; $\alpha = 60^\circ$; $v_0 = 3$ m/s

- Fais le bilan des forces qui s'exercent sur le solide entre A et O.
- Détermine :
 - l'expression de la vitesse v_A en fonction de v_0 , g , r et α .

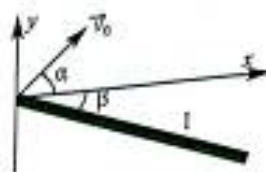
de sa trajectoire est :

$$y = -\frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} + x \tan \alpha.$$

Le projectile est réceptionné sur une planche au point I dans les deux cas ci-dessous.



1^{er} cas : La planche est parallèle à l'axe Ox
 $v_0 = 5$ m/s ; $\alpha = 45^\circ$;
 $h = 1$ m.



2^{ème} cas : La planche fait un angle $\beta = 30^\circ$ avec l'axe Ox
 $v_0 = 5$ m/s ; $\alpha = 45^\circ$.

- Montre que l'équation de la trajectoire peut s'écrire sous la forme $y = -0,4x^2 + x$
- Détermine les coordonnées x_I et y_I du point I dans chacun des deux cas.

2.2- la valeur v_A de la vitesse $\vec{v}_A$.

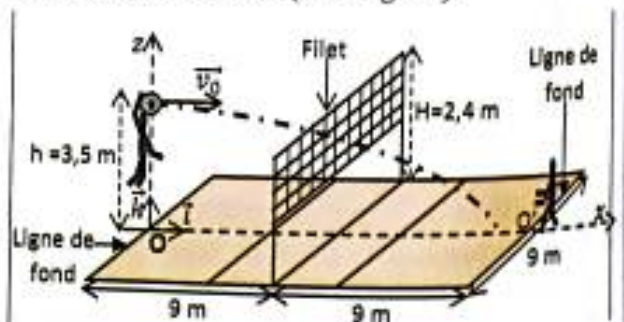
- 3- Établis :

- les équations horaires du mouvement du solide ;
- l'équation cartésienne de la trajectoire du solide.

- 4- Détermine :

- les coordonnées $(x_E$ et $y_E)$ du point E ;
- la valeur v_E de la vitesse du solide à son arrivée au point E.

14 Tu as suivi, en compagnie de ton ami de classe, un service "smashé", lors d'un match de volley-ball. À la date $t = 0$ s, le serveur saute pour frapper le ballon, considéré comme ponctuel, en un point situé à la hauteur h au-dessus de la ligne de fond du terrain. Le vecteur-vitesse initiale $\vec{v}_0$ du ballon est horizontal (voir figure).



Le service est réussi si la balle passe au-dessus du filet et tombe à moins de 9 m derrière celui-ci (entre le filet et la ligne de fond de l'équipe adverse).

Tu es chargé(e) de vérifier la validité du service.
Données : $v_0 = 21 \text{ m/s}$; $h = 3,5 \text{ m}$; $H = 2,4 \text{ m}$; $g = 10 \text{ m/s}^2$

1- Établis :

1.1- les équations horaires $x(t)$ et $z(t)$ du mouvement dans le repère $(O, \vec{i}, \vec{k})$.

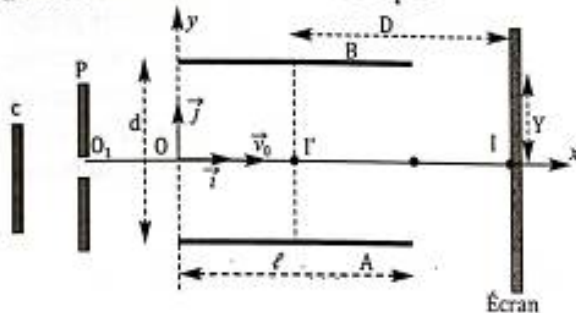
1.2- l'équation cartésienne de la trajectoire.

2- Montre que la balle ne touche pas le filet.

3- Détermine l'abscisse du centre d'inertie au moment où le ballon touche le sol s'il n'est pas intercepté.

4- Montre que le service est valable.

15 Ton groupe de travail étudie le mouvement d'un électron dans un oscilloscope.



Ce mouvement se décline comme suit.

Mouvement entre la cathode C et l'anode P.

La cathode émet des électrons, avec une vitesse nulle. Ces électrons sont accélérés entre la cathode C et l'anode P où existe une tension $U_{PC} = V_P - V_C$. Ils traversent l'anode par l'ouverture O_1 avec la vitesse v_0 .

Mouvement entre les plaques A et B.

Les électrons pénètrent en O entre les plaques chargées A et B horizontales, de longueur ℓ , séparées par une distance d . Entre A et B, existe une tension positive $U_{AB} = V_A - V_B$.

Apparition du spot sur l'écran.

le faisceau d'électrons arrive enfin, en un point I, sur un écran fluorescent, situé à la distance D du centre de symétrie des plaques A et B.

Ton groupe veut déterminer la vitesse v_0 et la déflexion électrostatique.

Tu es sollicité(e) pour la contribution.

Données : $U_{PC} = 2000 \text{ V}$; $U_{AB} = 100 \text{ V}$; $d = 2 \text{ cm}$; $\ell = 4 \text{ cm}$; $D = 40 \text{ cm}$; $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.

1- Représente le champ électrostatique $\vec{E}$ entre les plaques A et B.

2- Détermine la vitesse v_0 .

3- Établis :

3.1- les équations horaires du mouvement ;

3.2- l'équation de la trajectoire en fonction de U_{PC} , U_{AB} , d et x .

4- Détermine la déflexion électrostatique sur l'écran.

VI- RENDEZ-VOUS DES CURIEUX



Le canal de Corinthe est situé en Grèce. Il a été creusé pour relier la mer Égée et la mer Ionienne. Les parois rocheuses sont très hautes et l'eau s'écoule à 79 m au-dessous du niveau du sol. Plusieurs pilotes de moto avaient déjà eu l'intention de franchir le canal de Corinthe, situé en Grèce, mais seul l'Australien Robbie Maddison a réalisé cet exploit en avril 2010. Il a pris son élan pour accélérer sa moto et atteindre la vitesse de 125 km.h^{-1} . Il a ensuite emprunté une rampe qui lui a permis de franchir le canal, avant d'atterrir de l'autre côté. Le point le plus haut de son vol a dépassé les 95 mètres au-dessus du niveau de l'eau.

LEÇON

4

OSCILLATIONS MÉCANIQUES LIBRES

TABLEAU DES HABILITÉS ET DES CONTENUS

HABILITÉS	CONTENUS
Définir	un oscillateur mécanique.
Connaître	les caractéristiques générales d'un oscillateur mécanique.
Déterminer	l'équation différentielle d'un oscillateur mécanique non amorti.
Connaître	la forme générale de la solution de l'équation différentielle d'un oscillateur harmonique.
Déterminer	les caractéristiques du mouvement d'un oscillateur mécanique non amorti : - la pulsation propre ; - la période propre ; - la fréquence propre ; - l'amplitude ; - la phase à l'origine des dates.
Écrire	la solution de l'équation différentielle.
Montrer	la conservation de l'énergie mécanique d'un oscillateur non amorti.
Tracer	les graphes $x(t)$ et $v(t)$.
Exploiter	les graphes $x(t)$ et $v(t)$.

NOTIONS ESSENTIELLES

- Oscillateur mécanique
- Équation différentielle
- Équation horaire
- Pulsation propre
- Période propre
- Fréquence propre
- Amplitude
- Phase à la date $t = 0$
- Conservation de l'énergie mécanique d'un oscillateur non amorti

SITUATION D'APPRENTISSAGE

Un élève de ta classe a suivi, à la télé, une compétition sportive dans laquelle on utilise un appareil appelé "bâton sauteur" ou "échasse à ressort". Le bâton sur lequel, le compétiteur se tient debout, est une perche comprenant à son extrémité supérieure deux poignées et à son extrémité inférieure un dispositif à ressort permettant des oscillations. Le ressort subit des compressions et des détentes qui permettent au compétiteur de se déplacer. Emmerveillé par ce qui lui a été donné de voir, l'élève informe ses camarades de classe. Ensemble, les élèves de la classe entreprennent, avec l'aide de leur professeur, de définir un oscillateur mécanique, d'établir l'équation différentielle d'un oscillateur mécanique, d'écrire l'équation horaire et les expressions des énergies (potentielle, cinétique et mécanique) du système.



I- ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1 : DÉFINIR UN OSCILLATEUR MÉCANIQUE

Tu utilises un ressort de raideur $k = 18 \text{ N/m}$ et un solide de masse $m = 250 \text{ g}$. Tu disposes le ressort verticalement et tu accroches le solide de masse m .

- 1- Déforme le ressort en tirant le solide vers le bas puis lâche l'ensemble sans vitesse initiale.
- 2- Qu'observes-tu ?
- 3- Définis un oscillateur mécanique.
- 4- Mesure la durée de 10 oscillations (10 aller-retour) pour chacune des abscisses X_m du centre d'inertie du solide puis complète le tableau ci-contre.
- 5- Définis la période T d'une oscillation puis calcule sa valeur pour cet oscillateur.
- 6- Montre que la période est indépendante de l'amplitude X_m .

$X_m \text{ (cm)}$	$\Delta t = 10 T \text{ (s)}$	$T \text{ (s)}$
5		
7		
9		



Document 1 : Un pendule élastique

Je fais le point de l'activité

1- Définition d'un oscillateur mécanique

Le ressort, déformé puis lâché, se met à effectuer des va-et-vient autour d'une position d'équilibre. Un oscillateur est un système évoluant de part et d'autre d'une position d'équilibre stable. Les grandeurs caractéristiques du système oscillatoire sont :

- l'abscisse linéaire x ou l'abscisse angulaire θ ;
- la période T ou la fréquence f ou la pulsation ω .

Les oscillations sont dites périodiques si l'amplitude est constante et dites pseudo-périodiques si l'amplitude diminue au cours du temps.

2- Tableau de mesures

$X_m \text{ (cm)}$	$\Delta t \text{ (s)}$	$T \text{ (s)} = \Delta t / 10$
5	7,5	0,75
7	7,4	0,74
9	7,4	0,74

3- Définition de la période

La période est la durée minimale d'une oscillation complète.

Pour cette expérience, chaque essai donne : $T = \frac{\Delta t}{10}$

La moyenne des 3 essais est : $T = \frac{0,75 + 0,74 + 0,74}{3} = 0,74 \text{ s}$

Aux erreurs de mesure près, pour les trois amplitudes, la valeur de la période est $T = 0,74 \text{ s}$.

La période est indépendante de l'amplitude X_m .

J'évalue mes acquis

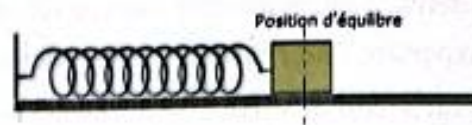


Définis un oscillateur mécanique.

ACTIVITÉ 2 : ÉTABLIR L'ÉQUATION DIFFÉRENTIELLE DU MOUVEMENT D'UN PENDULE ÉLASTIQUE HORIZONTAL NON AMORTI

Tu disposes d'un oscillateur mécanique horizontal constitué d'un ressort, de raideur k , de masse négligeable et d'un solide de masse m .

- 1- Fais les schémas des différentes positions du dispositif expérimental.
- 2- Établis l'équation différentielle du pendule élastique horizontal.



Document 3 : Oscillateur mécanique horizontal

Je fais le point de l'activité

Établissement de l'équation différentielle du mouvement

- Système : le solide de masse m ;
- Référentiel : Terrestre supposé galiléen ;
- Bilan des forces extérieures :

le poids $\vec{P}$ du solide ;

la réaction $\vec{R}$ du support horizontal ;

la tension $\vec{T} = -k\vec{OG} = -kx\vec{i}$ du ressort (force de rappel).

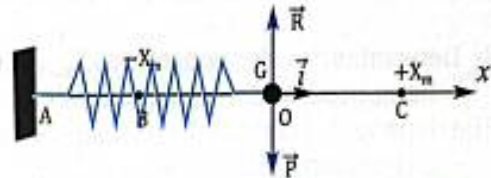


Fig. 1 : Le solide est en position d'équilibre stable, $x = 0$.

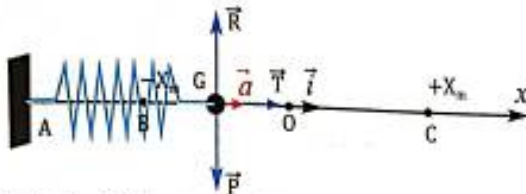


Fig. 2 : Le solide est en position d'équilibre instable, $x \neq 0$. Le ressort est comprimé, le solide est en mouvement.

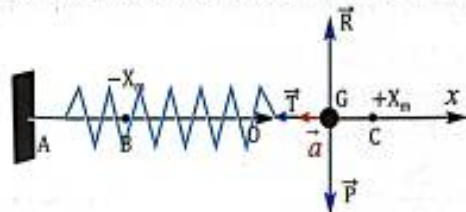


Fig. 3 : Le solide est en position d'équilibre instable, $x \neq 0$. Le ressort est étiré, le solide est en mouvement.

En position d'équilibre, $\vec{OG} = \vec{OG}_0 = \vec{0}$, à la date t : $\vec{OG} = x\vec{i}$.

D'après la relation du centre d'inertie : $\sum \vec{f} = m\vec{a}$ donc $\vec{P} + \vec{R} + \vec{T} = m\vec{a}$.

Les forces de frottements étant nulles, à chaque instant du mouvement de S, $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$.

À chaque instant, la somme vectorielle des forces se réduit à la tension du ressort. $\sum \vec{f} = \vec{T}$ soit $\vec{T} = m\vec{a}$ comme $\vec{a} = a_x\vec{i} = \ddot{x}\vec{i}$ alors $\vec{T} = m\ddot{x}\vec{i}$ (1).

Sens du vecteur accélération : $\vec{T}$ et $\vec{a}$ ont le même sens.

Lorsque le solide s'éloigne du point O (Fig. 2), son mouvement est retardé : $\vec{a} \cdot \vec{v} < 0$.

Lorsque le solide se rapproche du point O (Fig. 3), son mouvement est accéléré : $\vec{a} \cdot \vec{v} > 0$.

Dans les positions du solide (figures 2 et 3), la tension $\vec{T}$ et le vecteur position $\vec{OG}$ sont de sens opposés.

$$\vec{T} = -k\vec{OG}; \quad \vec{T} = -kx\vec{i} \quad (2)$$

L'égalité entre (1) et (2) donne : $m\ddot{x}\vec{i} = -kx\vec{i}$ soit $m\ddot{x} = -kx$ et finalement $\ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0$

C'est l'équation différentielle du mouvement de S.

J'évalue mes acquis



Un point mobile est animé d'un mouvement rectiligne et sinusoïdal d'équation horaire : $x(t) = 0,04\cos(10t)$. Il décrit un segment [AB] centré sur le point O.

Montre que son abscisse x vérifie l'équation $\ddot{x} + 100x = 0$.

ACTIVITÉ 3 : VÉRIFIER LA SOLUTION DE L'ÉQUATION DIFFÉRENTIELLE

Reprend l'équation différentielle trouvée dans l'activité 2.

- 1- Vérifie que l'équation $x(t) = X_m\cos(\omega_0 t + \varphi)$ est solution de cette équation différentielle.
- 2- Détermine les constantes X_m , ω_0 , φ et la période T_0 .
- 3- Donne les expressions de la vitesse $\dot{x}(t)$ et de l'accélération $\ddot{x}(t)$.
- 4- Représente l'abscisse $x(t)$, la vitesse $\dot{x}(t)$ et l'accélération $\ddot{x}(t)$ sur le même graphique.

Je fais le point de l'activité

1- Solution de l'équation différentielle, expressions de la vitesse $\dot{x}$ et de l'accélération $\ddot{x}$

$$x(t) = X_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$$

En dérivant successivement x et $\dot{x}$, on obtient : $\dot{x} = -\omega_0 X_m \sin(\omega_0 t + \varphi)$ et $\ddot{x} = -\omega_0^2 X_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$

En reportant dans l'équation différentielle, on a :

$$-\omega_0^2 X_m \cos(\omega_0 t + \varphi) + \frac{k}{m} X_m \cos(\omega_0 t + \varphi) = \left(-\omega_0^2 + \frac{k}{m}\right) X_m \cos(\omega_0 t + \varphi) = 0$$

comme $X_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$ est variable, alors l'expression précédente est à chaque instant nulle si

$$\text{et seulement si } \omega_0^2 = \frac{k}{m}$$

En conclusion : $x = X_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$ est solution de l'équation différentielle $\ddot{x} + \frac{k}{m} x = 0$.

2- Détermination des constantes X_m , ω_0 , φ et T_0

- L'amplitude : $X_m > 0$, c'est la valeur maximale de x

Elle dépend des conditions initiales ; en particulier si à $t = 0$, $v_0 = 0$, alors $X_m = |x_0|$.

- La pulsation propre : ω_0

$$\text{D'après ce qui précède : } \omega_0^2 = \frac{k}{m} \text{ donc : } \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

- La phase à $t = 0$ s est φ .

Elle dépend des conditions initiales. On détermine φ à partir de : $x(0) = X_m \cos \varphi$ et $\dot{x}(0) = -\omega_0 X_m \sin \varphi$.

- Période propre T_0 et fréquence propre f_0 .

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} ; f_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

En se référant à l'activité 1, $T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{0,25}{18}} = 0,74$ s. Donc $T_{\text{expérimentale}} = T_{\text{théorique}}$

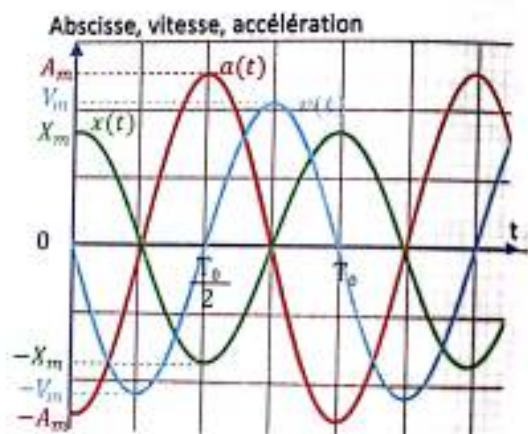
Remarque : le terme « propre » dans les expressions : pulsation propre, période propre et fréquence propre, montre que ω_0 , T_0 et f_0 ne dépendent que des grandeurs k et m du système ; les oscillations sont dites libres.

4- Représentation graphique de $x(t)$, $\dot{x}(t)$ et $\ddot{x}(t)$

$$x = X_m \cos(\omega t) ; \dot{x} = -\omega_0 X_m \sin(\omega_0 t) = -V_m \sin(\omega_0 t) ; \ddot{x} = -\omega_0^2 X_m \cos(\omega_0 t) = -A_m \cos(\omega_0 t)$$

$$\text{Avec } A_m = \omega_0^2 X_m \text{ et } V_m = \omega_0 X_m$$

t	0	$\frac{T_0}{4}$	$\frac{T_0}{2}$	$\frac{3T_0}{4}$	T_0
ωt	0	$\frac{\pi}{2}$	π	$\frac{3\pi}{2}$	2π
$\cos(\omega t)$	1	0	-1	0	1
$\sin(\omega t)$	0	1	0	-1	0
x	X_m	0	$-X_m$	0	X_m
$\dot{x}$	0	$-V_m$	0	V_m	0
$\ddot{x}$	$-A_m$	0	A_m	0	$-A_m$



J'évalue mes acquis



Soit l'équation différentielle d'un oscillateur mécanique non amorti : $\ddot{x} + \frac{k}{m} x = 0$.
Montre que l'équation horaire $x = X_m \sin\left(\frac{2\pi}{T_0} t + \varphi\right)$ est solution de l'équation différentielle.

ACTIVITÉ 4 : MONTRER LA CONSERVATION DE L'ÉNERGIE MÉCANIQUE D'UN OSCILLATEUR NON AMORTI

Considère, l'oscillateur non amorti étudié dans l'activité 2.

- 1- Écris les expressions des énergies (potentielle E_p , cinétique E_c et mécanique E_m) en fonction du temps.
- 2- Montre que l'énergie mécanique de l'oscillateur non amorti se conserve.
- 3- Représente l'énergie cinétique, l'énergie potentielle et l'énergie mécanique, en fonction de l'abscisse x , sur un même graphique.

Je fais le point de l'activité

1- Expression de l'énergie potentielle

Abscisse : $x = X_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$

Energie potentielle : $E_p = E_{pp} + E_{pe}$

E_{pp} : énergie potentielle de pesanteur ;

$E_{pe} = \frac{1}{2} kx^2$ énergie potentielle élastique (due au ressort)

$E_{pp} = 0$ J sur le plan horizontal contenant le centre d'inertie du solide.

$$E_p = E_{pe} = \frac{1}{2} kx^2 \quad ; \quad E_p = \frac{1}{2} kX_m^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi).$$

2- Expression de l'énergie cinétique

Vitesse : $x = -\omega_0 X_m \sin(\omega_0 t + \varphi)$

$$\text{Energie cinétique : } E_c = \frac{1}{2} mx^2 = \frac{1}{2} m\omega_0^2 X_m^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi) = \frac{1}{2} kX_m^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi).$$

3- Energie mécanique totale

$$E_m = E_p + E_c = \frac{1}{2} kX_m^2 [\cos^2(\omega_0 t + \varphi) + \sin^2(\omega_0 t + \varphi)], \text{ comme } \cos^2(\omega_0 t + \varphi) + \sin^2(\omega_0 t + \varphi) = 1$$

$$\text{alors } E_m = \frac{1}{2} kX_m^2 \text{ ou } E_m = \frac{1}{2} m\omega_0^2 X_m^2.$$

4- Conservation de l'énergie mécanique

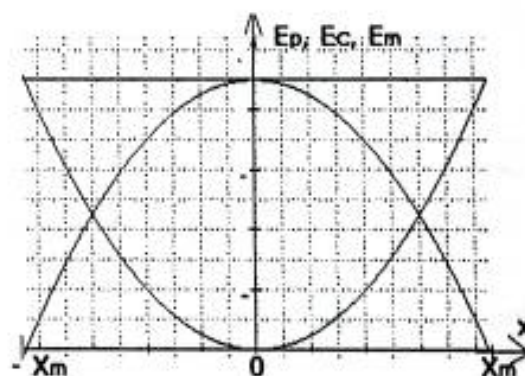
Puisque k et X_m sont des constantes, alors E_m est constante. $E_m = \frac{1}{2} kX_m^2 = \text{Cte}$

L'énergie mécanique d'un oscillateur non amorti se conserve.

5- Représentations des énergies en fonction de l'abscisse x

$$E_m = \frac{1}{2} kX_m^2 \quad ; \quad E_p = \frac{1}{2} kx^2 \quad ; \quad E_c = E_m - \frac{1}{2} kx^2$$

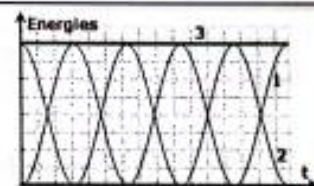
x	E_m	E_p	E_c
$-X_m$	$\frac{1}{2} kX_m^2$	$\frac{1}{2} kX_m^2$	0
0	$\frac{1}{2} kX_m^2$	0	$\frac{1}{2} kX_m^2$
X_m	$\frac{1}{2} kX_m^2$	$\frac{1}{2} kX_m^2$	0



J'évalue mes acquis



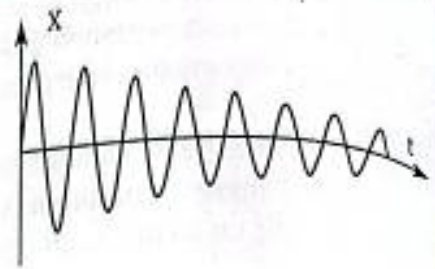
Les courbes 1, 2 et 3 sont les représentations graphiques des énergies (potentielle E_p , cinétique E_c et mécanique E_m) en fonction du temps t . Associe le numéro de chaque courbe à la forme d'énergie qui lui correspond.



ACTIVITÉ 5 : MONTRER LA NON CONSERVATION DE L'ÉNERGIE D'UN OSCILLATEUR AMORTI

Tu as maintenant à ta disposition un oscillateur mécanique horizontal avec des frottements.

La courbe de variation de l'abscisse en fonction du temps $x(t)$ obtenue est représentée par le document 3.



1- Fais le bilan des forces qui s'exercent sur le système.

2- Montre que l'équation différentielle du mouvement n'est plus égale à $\ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0$.

3- Montre, à partir de la représentation graphique, que l'énergie mécanique ne se conserve pas.

Document 3 : Représentation de l'abscisse d'un oscillateur mécanique amorti

Je fais le point de l'activité

1- Bilan des forces qui s'exercent sur le système

Le nouveau bilan des forces donne : le poids $\vec{P}$, la réaction $\vec{R}$ du support, la tension $\vec{T} = -kx\vec{i}$ et la force de frottement $\vec{f}$.

Remarque : la force $\vec{f}$ est proportionnelle à la vitesse : $\vec{f} = -\lambda\vec{v} = -\lambda\dot{x}\vec{i}$ car elle s'oppose au déplacement du solide. λ est le coefficient de frottement.

2- Équation différentielle

L'application du théorème du centre d'inertie donne :

$$\vec{P} + \vec{R} + \vec{T} + \vec{f} = m\vec{a}$$

$$0 + 0 - kx - \lambda v = m\ddot{x}, \text{ d'où } \ddot{x} + \frac{\lambda}{m}\dot{x} + \frac{k}{m}x = 0.$$

La présence de la force de frottement, dans le théorème

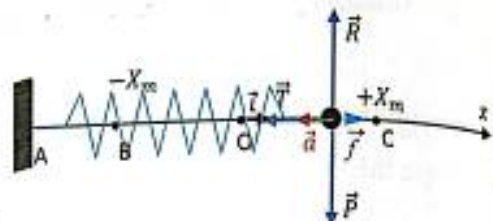
du centre d'inertie, ne permet plus d'obtenir

l'équation différentielle d'un oscillateur harmonique. La représentation graphique de $x(t)$ n'est plus une sinusoïde. Les oscillations sont pseudo-périodiques.

3- Non conservation de l'énergie

L'amplitude de $x(t)$ décroît au cours du temps, il y a dissipation d'énergie sous forme de chaleur.

Après plusieurs oscillations, le solide finit par s'immobiliser.

**J'évalue mes acquis**

Recopie et complète la phrase ci-dessous par les mots ou groupes de mots qui conviennent.

L'amplitude d'un oscillateur mécanique amorti ... au cours du temps, les oscillations sont ...

II- RÉSUMÉ DE COURS**Tension d'un ressort**

La tension $\vec{T}$ d'un ressort est opposée au vecteur position $\vec{OG}$: $\vec{T} = -k\vec{OG} = -kx\vec{i}$.

Équation différentielle d'un pendule élastique non amorti

$$\ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0.$$

Équation horaire d'un pendule élastique non amorti

$$x = X_m \cos(\omega_0 t + \varphi) = X_m \cos\left(\frac{2\pi}{T_0} t + \varphi\right).$$

$$\text{Pulsation propre : } \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

période propre : $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

Fréquence propre : $f_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$

Energie mécanique d'un oscillateur non amorti

$$E_m = \frac{1}{2}kX_m^2.$$

L'énergie mécanique d'un oscillateur non amorti se conserve.

Oscillateur amorti

L'énergie mécanique n'est pas constante, l'amplitude des oscillations diminue au cours du temps.

III- MÉTHODES

- Pour établir l'équation différentielle, on peut utiliser :
 - le théorème du centre d'inertie ;
 - ou la conservation de l'énergie mécanique.
- Constantes de l'équation horaire $x = X_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$:
 - $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$;
 - φ et X_m s'obtiennent en utilisant l'instant initial $t = 0$ s : $x(0) = X_m \cos \varphi$,
et $x'(0) = v_{0x} = -\omega_0 X_m \sin \varphi$.

IV- EXERCICES RÉSOLUS

Exercice 1

L'équation horaire du mouvement d'un oscillateur mécanique est donnée par la relation

$$x = 0,05 \cos\left(10t - \frac{\pi}{3}\right). \text{ (en mètre)}$$

Donne les valeurs de la pulsation propre ω_0 , de l'amplitude X_m des oscillations et de la phase φ à l'origine.

Exercice 2

Un oscillateur mécanique est constitué d'un ressort horizontal, de raideur $k = 15$ N/m, relié à un solide de masse $m = 150$ g. À la date $t = 0$ s, le centre d'inertie du solide part, sans vitesse initiale, du point A d'abscisse $x_0 = -5$ cm.

- 1- La pulsation propre est :
 - a) $\omega_0 = 15$ rad/s ;
 - b) $\omega_0 = 150$ rad/s ;
 - c) $\omega_0 = 10$ rad/s.
- 2- L'amplitude des oscillations est :
 - a) $X_m = -5$ cm ;
 - b) $X_m = 5$ cm ;
 - c) $X_m = 0$ cm.
- 3- La phase à la date $t = 0$ s est :
 - a) $\varphi = 0$ rad ;
 - b) $\varphi = \pi$ rad ;
 - c) $\varphi = \frac{\pi}{2}$ rad.

Écris, pour chacune des propositions, le chiffre suivi de la lettre correspondant à la bonne réponse.

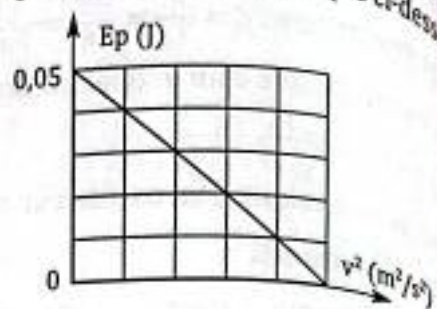
Exercice 3

L'énergie potentielle d'un oscillateur mécanique non amorti est représentée sur le graphique ci-dessous.

- 1- Donne la valeur la valeur de l'énergie mécanique E_m .
- 2- Donne les expressions des énergies potentielle et cinétique sous les formes : $E_p = E_{pmax} \cos^2(\omega_0 t)$ et $E_c = E_{cmax} \sin^2(\omega_0 t)$.

- 3- Détermine la vitesse maximale de l'oscillateur.

Donnée : $m = 200 \text{ g}$.



Exercice 4

Établis l'équation différentielle en utilisant la conservation de l'énergie mécanique d'un oscillateur mécanique.

Résolution de l'exercice 1

- La pulsation propre est $\omega_0 = 10 \text{ rad/s}$.
- L'amplitude des oscillations est $X_m = 0,05 \text{ m}$.
- La phase à l'origine est $\varphi = -\frac{\pi}{3} \text{ rad}$.

Commentaire :

L'équation horaire donnée dans l'énoncé est : $x = 0,05 \cos(10t - \frac{\pi}{3})$.

L'équation horaire donnée dans le cours est : $x = X_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$.

ω_0 , X_m et φ s'obtiennent par identification.

Résolution de l'exercice 2

1-c) ; 2-b) ; 3-b).

Commentaire :

- $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} = 10 \text{ rad/s}$
- $x(0) = x_0 = X_m \cos(\varphi)$ et $x'(0) = v_0 = -\omega_0 X_m \sin(\varphi) \Rightarrow \frac{v_0}{\omega_0} = X_m \sin(\varphi)$
- $X_m = \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{v_0}{\omega_0}\right)^2} = x_0 = 5 \text{ cm}$ car $v_0 = 0 \text{ m/s}$
- $\varphi = \cos^{-1}\left(\frac{x_0}{X_m}\right) = \pi \text{ rad}$.

Résolution de l'exercice 3

1- $E_m = 0,05 \text{ J}$.

2- $E_p = 0,05 \cos^2(\omega_0 t)$ et $E_c = 0,05 \sin^2(\omega_0 t)$

3- $E_{cmax} = \frac{1}{2} m v_{max}^2$; $v_{max} = \sqrt{\frac{2E_{cmax}}{m}}$; $v_{max} = \sqrt{\frac{2 \times 0,05}{0,2}} = 0,71 \text{ m/s}$.

Commentaire :

$E_m = E_p + E_c$

Si $E_{cmax} = 0$ alors $E_m = E_{pmax}$ puis si $E_p = 0$ alors $E_m = E_{cmax}$

Donc $E_m = E_{pmax} = E_{cmax}$

3- $E_{cmax} = 0,05 \text{ J}$

Résolution de l'exercice 4

$$E_m = \frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}m\dot{x}^2 = \text{cste} \rightarrow \frac{dE_m}{dt} = \frac{1}{2}k(2x\dot{x}) + \frac{1}{2}m(2\dot{x}\ddot{x}) = \dot{x}(kx + m\ddot{x}) = 0$$

Quel que soit $\dot{x}$ on a : $m\ddot{x} + kx = 0$ soit $\ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0$

Commentaire :

Voir cours

V- JE M'EXERCE

Exercices de fixation/ Application

1 Un mobile ponctuel M est en mouvement rectiligne et sinusoïdal d'équation :

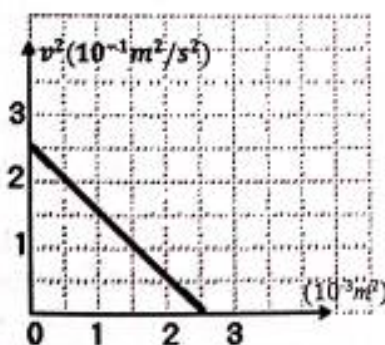
$$x(t) = 2.10^{-2} \cos\left(40\pi t - \frac{\pi}{6}\right)$$

- 1- Précise l'amplitude X_m , la pulsation propre ω_0 , la période propre T_0 , la fréquence propre f_0 , la phase initiale φ .
- 2- Donne l'expression de sa vitesse x à la date t . Calcule la vitesse maximale V_m .
- 3- Détermine l'accélération x au point d'abscisse $x = 0,01$ m.

2 Un point M est animé d'un mouvement rectiligne et sinusoïdal, sur un segment [AB], de longueur 10 cm. La durée de 10 oscillations est $T = 10$ s.

- 1- Calcule la période propre T_0 et la pulsation propre ω_0 .
- 2- Calcule l'amplitude X_m .
- 3- Écris l'équation horaire $x(t) = X_m \cos(\omega_0 t)$.

3 Dans un oscillateur mécanique, la relation entre v^2 et x^2 s'écrit : $v^2 = \frac{2E_m}{m} - \omega_0^2 x^2$ ($E_m = 0,0625$ J ; $m = 0,5$ kg). Soit ci-dessous la courbe $v^2 = f(x^2)$.



On donne les valeurs de ω_0 , X_m et k .

ω_0 (rad/s)	10	20	40
X_m (m)	0,02	0,05	0,03
k (N/m)	60	100	50

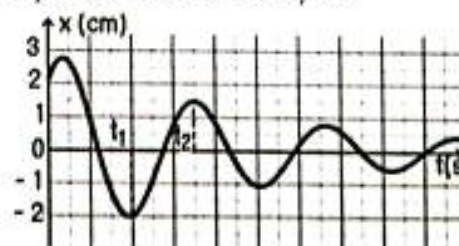
Choisis la bonne valeur pour chaque grandeur.

4 Relie le nom de la grandeur physique à son expression par un trait après avoir reproduis les diagrammes.

Accélération	•	• $-\omega_0 X_m \cos(\omega_0 t)$
Élongation	•	• $-\frac{k}{m}x$
Énergie potentielle	•	• $X_m \cos(\omega_0 t)$
Pulsation propre	•	• $\frac{1}{2}kX_m^2$
		• $-\omega_0^2 X_m \cos(\omega_0 t)$

5 Un point mobile M est repéré sur un axe Ox, par l'abscisse $OM = x$ telle que $x + 1444x = 0$. À $t = 0$ s, le mobile est au point M_0 d'abscisse $x_0 = 1$ cm et a pour vitesse $v_{0x} = -0,5$ m/s. Établis la loi horaire du mouvement.

6 Le solide d'un oscillateur mécanique est soumis à une force de frottement visqueux. On a enregistré les variations de l'élongation en fonction du temps. Donnée : $k = 50$ N/m.

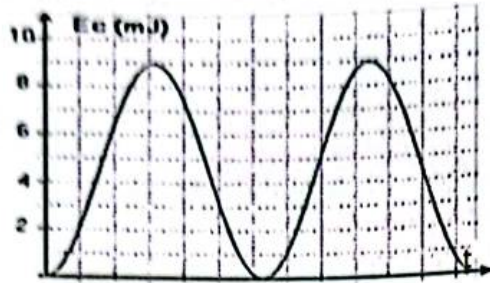


Montre, à partir de l'allure de la courbe, que l'énergie mécanique ne se conserve pas.

7 L'énergie cinétique d'un oscillateur mécanique peut se mettre sous la forme

$$E_c = \frac{1}{4} k X_m^2 [1 - \cos(2\omega_0 t + 2\varphi)].$$

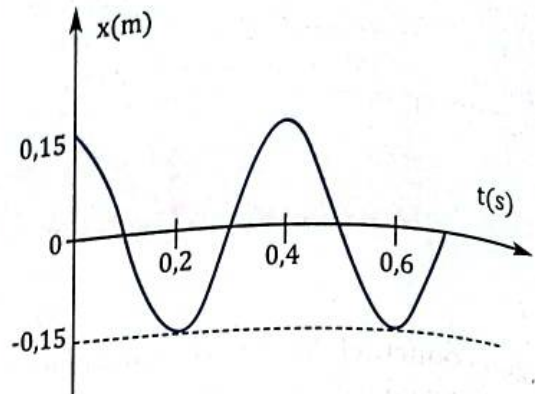
On donne ci-dessous la représentation graphique de E_c en fonction du temps t .



- 1- Donne la valeur de l'énergie mécanique de l'oscillateur.
- 2- Détermine à $t = 0$ s la valeur de :
 - 2.1- l'énergie cinétique ;
 - 2.2- φ .

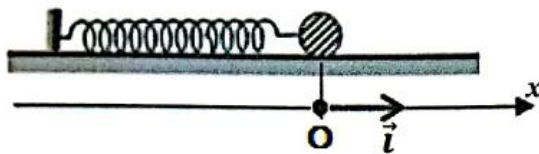
8 Soit $x(t) = X_m \cos\left(\frac{2\pi}{T_0} t + \varphi\right)$ l'équation horaire d'un oscillateur mécanique non amorti.

- 1- Détermine T_0 , X_m , φ .
- 2- Écris l'équation horaire.



Exercices de renforcement/Approfondissement

9 Un solide ponctuel de masse m , pouvant glisser sans frottement sur un plan horizontal, est relié à l'une des extrémités d'un ressort à spires non jointives. L'autre extrémité d'un ressort est fixe.



Le ressort, de raideur k et de masse négligeable, a une longueur au repos ℓ_0 .

Données : $k = 50$ N/m ; $m = 0,5$ kg.

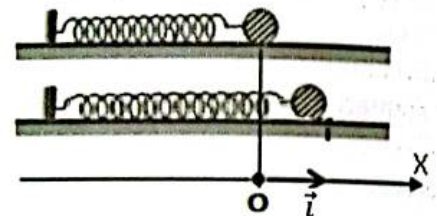
- 1- Établis l'équation différentielle du mouvement du système solide-ressort. L'origine O de l'axe Ox correspond à la position du solide lorsque le ressort est au repos.
- 2- Détermine l'équation horaire du mouvement du solide dans chacun des cas ci-dessous.
 - 2.1- À la date $t = 0$ s, le solide est en $x = x_0 = 5$ cm et sa vitesse initiale est nulle.
 - 2.2- À la date $t = 0$ s, le solide est en $x = 0$ m et sa vitesse est $v_{0x} \vec{i}$ avec $v_{0x} = 0,5$ m/s

10 Un oscillateur mécanique non amorti a pour équation horaire : $x = X_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$

- 1- Détermine l'expression de la vitesse en fonction du temps.
- 2- Détermine en fonction du temps, les expressions :
 - 2.1- de l'énergie cinétique E_c ;

- 2.2- de l'énergie potentielle élastique E_p ;
- 2.3- de l'énergie mécanique du système E_m .

11 Soit un pendule élastique horizontal constitué d'un ressort à spires non jointives de raideur $k = 50$ N/m relié à l'une de ses extrémités à un support fixe et à l'autre extrémité à un solide de masse $m = 0,5$ kg.

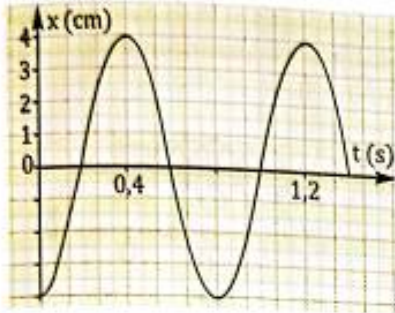


On écarte le solide de sa position d'équilibre d'une distance $X_m = 2$ cm, puis on le lâche sans vitesse initiale.

Lorsque le solide passe par sa position d'abscisse $x_0 (x_0 = 0)$ avec une vitesse initiale $v_0 (v_{0x} < 0)$, on déclenche le chronomètre (c'est l'instant $t = 0$ s pour commencer l'étude du mouvement).

- 1- Établis l'équation différentielle du mouvement.
- 2- L'une des solutions de l'équation différentielle est : $x(t) = X_m \sin(\omega_0 t + \varphi)$.
 - 2.1- Détermine les constantes ω_0 , φ et la période propre T_0 des oscillations du solide.
 - 2.2- Établis l'expression de la vitesse du solide.

12 Un pendule élastique horizontal est constitué d'un ressort de raideur k et d'un solide de masse $m = 0,2 \text{ kg}$. On écarte le solide vers un point A d'abscisse x_A , puis à la date $t = 0 \text{ s}$, on l'abandonne à lui-même sans vitesse initiale. Au cours de son mouvement, le solide se déplace sans frottement et son centre d'inertie est repéré par l'élongation x . Un système d'acquisition de données, enregistre les variations de l'élongation au cours du temps ci-dessous.

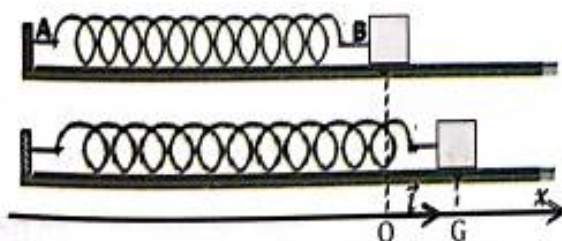


- 1- Détermine :
 - 1.1- la période T des oscillations ;
 - 1.2- l'abscisse initiale x_0 du solide et la constante de raideur k du ressort.
- 2- Donne le sens dans lequel, débute le mouvement du solide.
- 3- Écris l'équation horaire du mouvement sous la forme $x = X_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$.
- 4- Détermine la vitesse et l'accélération du solide pour $x = 2 \text{ cm}$ (la vitesse étant négative).

Situations d'évaluation

14 Au cours d'une expérience, le professeur de Physique met à la disposition de ton groupe de travail le matériel suivant :

- un solide S supposé ponctuel de masse $m = 0,3 \text{ kg}$ pouvant glisser sans frottement sur un axe horizontal,
- un ressort à spires non jointives de masse négligeable, de raideur $k = 120 \text{ N/m}$ accroché au solide par l'une de ses extrémités au point A. L'autre extrémité du ressort est accrochée en B.



La position du centre d'inertie G du solide est repérée par l'abscisse $OG = x$ sur un axe $(O, \vec{i})$. À

13 Soit un pendule élastique horizontal comprenant un ressort de raideur k , de masse négligeable et un solide de masse m , pouvant se déplacer sans frottement. On écarte le solide de sa position d'équilibre, son centre d'inertie est alors au point d'abscisse $x_0 = 0,05 \text{ m}$. L'expérimentateur lâche le solide sans vitesse initiale à la date $t = 0 \text{ s}$.

Données : $m = 100 \text{ g}$; $k = 30 \text{ N/m}$

- 1- Écris l'équation horaire $x = X_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$ du mouvement du système en fonction du temps.
- 2- Détermine la vitesse du solide au premier passage par la position d'équilibre.
- 3- Montre que l'énergie mécanique E_m du système ressort-solide est constante.
- 4- Calcule l'énergie mécanique du système.

l'équilibre, le ressort n'est pas déformé et le point G se trouve en O .

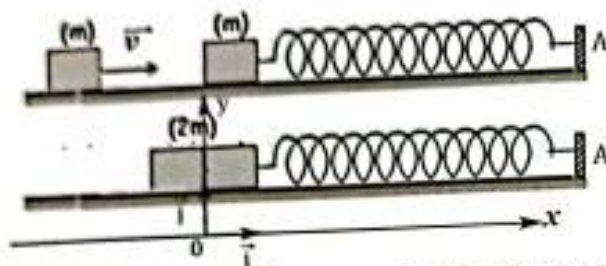
Le chef du groupe allonge le ressort en écartant le centre d'inertie de sa position d'équilibre, son abscisse est alors $x_0 = 10 \text{ cm}$. Il lâche le système sans vitesse initiale à $t = 0 \text{ s}$. La loi horaire s'écrit : $x = X_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$

Le professeur vous demande de faire une étude du système.

Tu es désigné(e) comme le rapporteur du groupe.

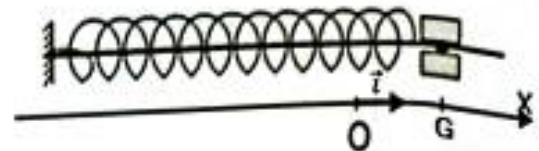
- 1- Établis l'équation différentielle du mouvement en appliquant le théorème du centre d'inertie ;
- 2- Montre que l'équation horaire $x = X_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$ est solution de l'équation différentielle.
- 3- Détermine les constantes X_m , ω_0 et φ .
- 4- Exprime, en fonction du temps :
 - 4.1- l'énergie potentielle E_p du système ;
 - 4.2- l'énergie cinétique E_c du système ;
 - 4.3- l'énergie mécanique E_m .

18 Ton groupe de travail, lors des révisions, étudie le système solide-ressort décrit ci-dessous. Le ressort à spires non jointives de raideur $k = 400 \text{ N/m}$, est fixé en un point A par l'une de ses extrémités. À l'autre extrémité est accroché un solide de masse $m = 500 \text{ g}$. Ce solide peut se déplacer sans frottement sur le plan horizontal. À l'équilibre, le centre d'inertie G se trouve en O. La position de G est repérée par $\vec{OG} = x\vec{i}$. Le solide, dans sa position d'équilibre, est frappé par un autre solide de masse $m = 500 \text{ g}$ animé d'un vecteur vitesse $\vec{v}$ de valeur $v = 2 \text{ m/s}$. Les deux solides s'accrochent et l'ensemble est animé de la vitesse v_0 à la date $t = 0 \text{ s}$, à l'abscisse $x_0 = 0 \text{ m}$.

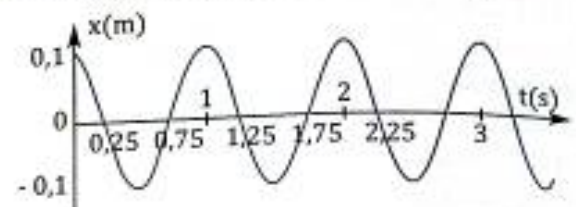


- 1- Détermine la valeur v_0 de la vitesse de l'ensemble juste après le choc.
- 2- Établis :
 - 2.1- l'équation différentielle du mouvement en utilisant la conservation de l'énergie mécanique après le choc ;
 - 2.2- l'équation horaire du mouvement après le choc en fonction du temps t .
- 3- Détermine les énergies mécaniques de l'oscillateur E_{m1} avant et E_{m2} après le choc.
- 4- Compare E_{m1} et E_{m2} et conclus.

19 Lors d'une séance de travaux dirigés, votre professeur vous demande d'étudier un pendule élastique horizontal non amorti en vue de déterminer son énergie mécanique. Ce pendule élastique horizontal comprend un solide de masse m et un ressort de masse négligeable de raideur $k = 4 \text{ N/m}$. Le solide de centre d'inertie G, peut glisser sans frottements sur une tige horizontale. Lorsque le solide est à l'équilibre, son centre d'inertie G se situe au point O, origine de l'axe des abscisses. Le solide est écarté de $x_0 = 10 \text{ cm}$ de sa position d'équilibre et abandonné sans vitesse initiale à la date $t = 0 \text{ s}$.

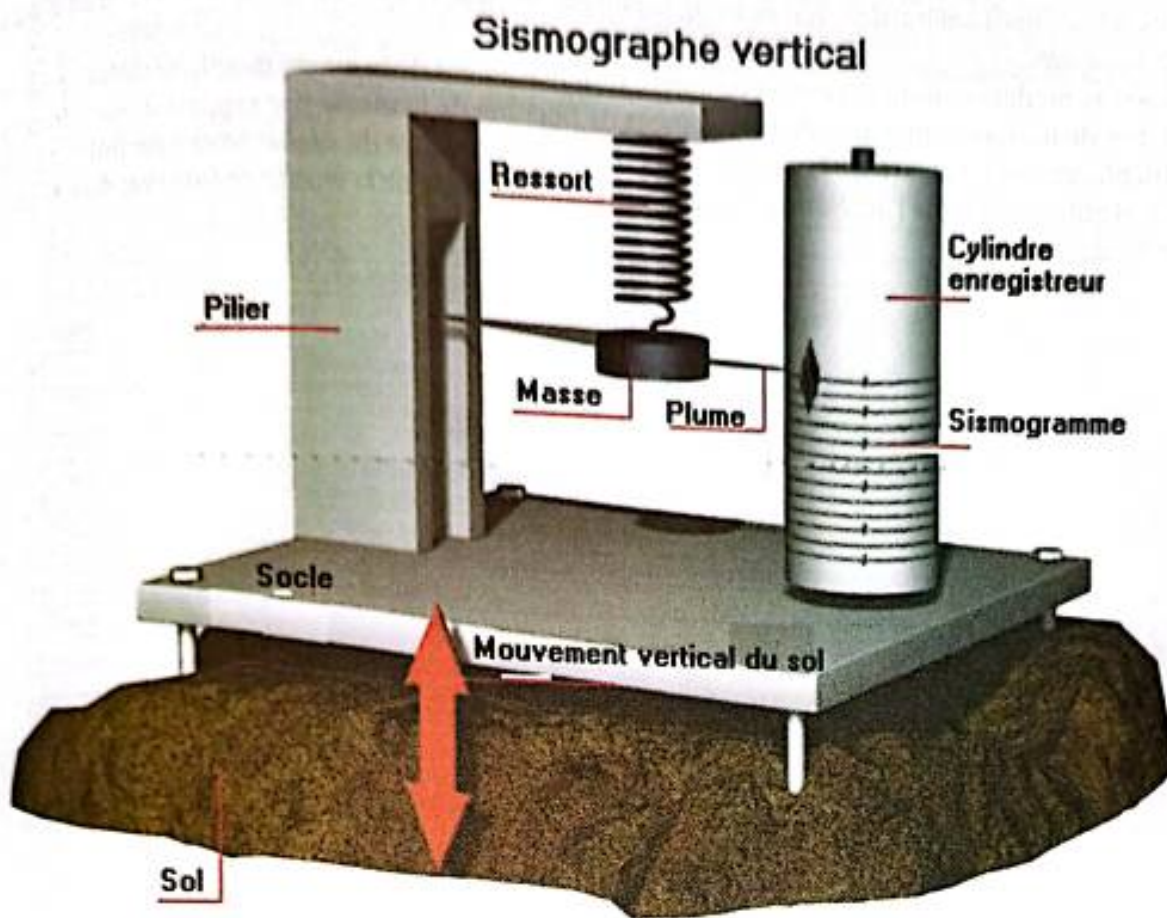


L'enregistrement des positions successives de G au cours du temps par un dispositif approprié a permis d'obtenir la courbe ci-dessous.



- 1- Représente les forces en G, sans souci d'échelle
- 2- Donne l'expression littérale de l'énergie mécanique du système (ressort + solide), en fonction de k , m , x et $\dot{x}$.
- 3- Détermine à partir de l'enregistrement ci-dessus les dates pour lesquelles l'énergie potentielle élastique du système est maximale.
- 4- Détermine la valeur de l'énergie mécanique du système.

VI- RENDEZ-VOUS DES CURIEUX



Un instrument sensible à de très petits déplacements du sol

Un sismomètre est un appareil sensible aux vibrations, qui repose sur le principe du pendule : une masse lourde et inerte, qui va de par son poids, présenter une certaine résistance ou inertie au mouvement (et que les géophysiciens appellent masse d'épreuve), est reliée à un bâti par une suspension ou ressort qui permet un mouvement. Lorsqu'une secousse se produit, la masselotte, excitée par l'énergie reçue, va se mettre à vibrer.

Création du sismogramme

Le sismomètre fournit des données sous la forme d'un sismogramme : il s'agit d'un enregistrement de l'ampleur des déplacements du sol en fonction du temps construit en mesurant régulièrement le décalage existant entre la position de la masse mobile et de la potence sur laquelle cette dernière est fixée, et ce par rapport à une position d'équilibre, c'est à dire lorsque l'appareil est au repos et qu'aucune perturbation ne se produit.

Historiquement, les premiers sismogrammes ont été créés par le biais de moyens élémentaires. Une pointe métallique, fixée sur la masse mobile, laissait une empreinte de son déplacement sur un papier recouvert de noir de fumée. Plus tard, la pointe a été remplacée par un stylet à encre, devant lequel défilait un ruban de papier enregistreur monté sur un tambour rotatif. Aujourd'hui, à l'ère de l'informatique, les sismomètres fournissent des signaux numériques enregistrés par des ordinateurs. Les sismomètres déposés sur la Lune par les missions Apollo étaient d'ailleurs parmi les premiers de ce genre, car même au début des années 1970, la plupart des stations terrestres étaient encore équipées de sismographes.

Les capteurs modernes dont le rôle est de suivre le déplacement de la masse mobile peuvent réaliser trois types de mesures : mesures du changement de position de la masse par rapport à une position zéro (déplacement), mesure de la vitesse de la masse (c'est à dire du déplacement en fonction du temps), et enfin mesure de l'accélération (c'est à dire les variations de la vitesse en fonction du temps). Adobe Stock).

LEÇON

5

CHAMP MAGNÉTIQUE

TABEAU DES HABILÉTÉS ET DES CONTENUS

HABILÉTÉS	CONTENUS
Définir	l'espace champ magnétique.
Déterminer	les caractéristiques du vecteur-champ magnétique.
Représenter	le vecteur-champ magnétique B .
Définir	- une ligne de champ. - le spectre magnétique.
Représenter	le spectre magnétique : - d'un aimant droit ; - d'un aimant en « U ».
Définir	un solénoïde.
Utiliser	- les règles d'orientation du champ magnétique . - les sources de champ magnétique.
Représenter	le spectre magnétique d'un solénoïde parcouru par un courant électrique continu.
Déterminer	les caractéristiques du champ magnétique créé par un solénoïde parcouru par un courant électrique.
Connaître	l'unité de champ magnétique.
Tracer	le graphe $B = f(I)$ pour un solénoïde.
Utiliser	la relation $B = \mu_0 n I$ avec $n = \frac{N}{l}$.
Déterminer	les composantes horizontale et verticale du champ magnétique terrestre.

NOTIONS ESSENTIELLES

- Espace champ magnétique
- Sources de champ magnétique
- Vecteur champ magnétique
- Ligne de champ magnétique
- Spectre magnétique
- Champ magnétique terrestre
- Solénoïde
- Règles d'orientation du vecteur champ magnétique
- Teslamètre

SITUATION D'APPRENTISSAGE

Pendant le cours de Géographie, tu apprends que, pour s'orienter sur la Terre, on a besoin d'une boussole. Tu effectues alors des recherches, dans une revue scientifique, qui te donnent la précision suivante. « La boussole contient une aiguille aimantée dont le pôle nord indique le nord magnétique incliné de quelques degrés par rapport au nord géographique. L'aiguille aimantée détecte le champ magnétique de la Terre ; la Terre est donc une source de champ magnétique ». En classe, tu parles de ces recherches à tes camarades. Ensemble, sous la conduite du professeur de Physique, vous décidez de définir un champ magnétique, de présenter des sources de champ magnétique, de réaliser des spectres magnétiques et d'étudier le champ magnétique créé par un courant dans une bobine.

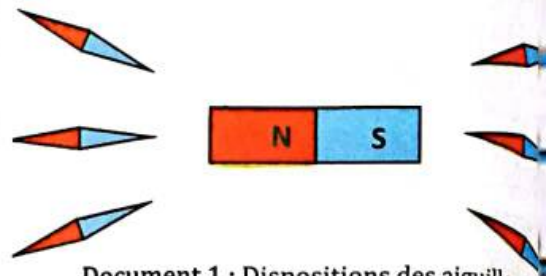


I- ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1 : DÉCOUVRIR LE CHAMP MAGNÉTIQUE CRÉÉ PAR UN AIMANT

Tu disposes d'un aimant droit immobile et d'aiguilles aimantées. Les pôles des aiguilles aimantées et de l'aimant sont symboliquement indiqués par des couleurs différentes selon leur nature.

- 1- Place les aiguilles aimantées en différents points autour de l'aimant.
- 2- Note l'orientation de chaque aiguille aimantée selon sa position.
- 3- Dégage la notion de champ magnétique créé par l'aimant.
- 4- Montre les interactions entre les pôles d'un aimant.



Document 1 : Dispositions des aiguilles aimantées autour d'un aimant

Je fais le point de l'activité

1- Orientation des aiguilles aimantées

Chaque aiguille aimantée s'oriente, en fonction de sa position, en présentant à l'aimant un pôle dont la nature est différente de celle du pôle de l'aimant en face.

2- Notion de champ magnétique

Les aiguilles aimantées, placées dans l'entourage de l'aimant, subissent une action magnétique de ce dernier. Un aimant est donc une source de **champ magnétique**. On dit aussi qu'un aimant crée un champ magnétique, tout comme une charge électrique crée un champ électrostatique. L'aiguille aimantée permet de détecter le champ magnétique.

3- Interaction entre les pôles d'un aimant

Le pôle sud de l'aiguille aimantée est attiré par le pôle nord de l'aimant, tandis qu'il est repoussé par le pôle sud de l'aimant.



Deux pôles de même nom se repoussent tandis que deux pôles de noms différents s'attirent.

J'évalue mes acquis



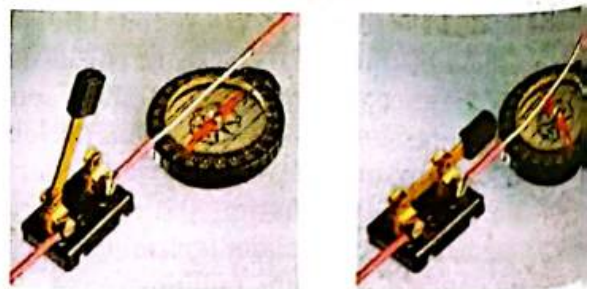
Recopie et complète les phrases ci-dessous avec les mots qui conviennent.

- 1- Un aimant droit est une source de détectée par
- 2- Deux pôles de nature différentetandis que deux pôles de même nature

ACTIVITÉ 2 : DÉCOUVRIR LE CHAMP MAGNÉTIQUE CRÉÉ PAR UN COURANT

Tu disposes d'un fil conducteur, d'une aiguille aimantée et d'un interrupteur à bascule. Le fil conducteur, parcouru par un courant électrique, est placé au-dessus de l'aiguille aimantée et parallèlement à celle-ci.

- 1- Ferme l'interrupteur et note tes observations.
- 2- Change le sens du courant dans le fil conducteur et note tes observations.
- 3- Interprète les observations.
- 4- Conclue.

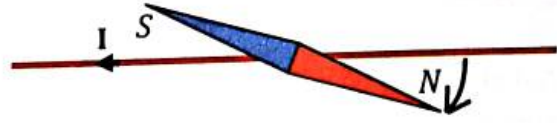
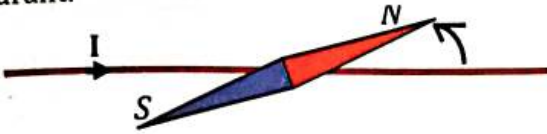


Document 2 : Expérience d'Oersted - Interaction courant - aimant

Je fais le point de l'activité

1- Observations

Lors du passage du courant, l'aiguille aimantée dévie. Le sens de déviation dépend du sens du courant.



2- Interprétation

La déviation de l'aiguille aimantée indique la présence d'un champ magnétique. Ce champ magnétique est créé par le courant qui circule dans le fil conducteur.

3- Conclusion

La circulation d'un courant électrique dans un fil conducteur crée un champ magnétique. L'intensité de ce champ dépend de l'intensité du courant électrique dans le fil conducteur.

J'évalue mes acquis



Réponds par vrai ou faux.

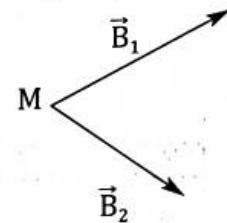
- 1- Il existe un champ magnétique autour d'un aimant.
- 2- Il existe un champ magnétique autour d'une bobine qui n'est pas parcourue par un courant électrique.
- 3- Une bobine parcourue par un courant électrique crée un champ magnétique.

ACTIVITÉ 3 : REPRÉSENTER LE VECTEUR CHAMP MAGNÉTIQUE $\vec{B}$

Comme dans tout champ, le champ magnétique est caractérisé par un vecteur champ magnétique noté $\vec{B}$.

1- Recherche :

- 1.2- les caractéristiques du vecteur champ magnétique ;
- 1.2- le nom de l'appareil de mesure du champ magnétique et son unité.

2- Fais la somme de deux vecteurs champs magnétiques $\vec{B}_1$ et $\vec{B}_2$ en un point M (document 3).

Document 3 : Champs magnétiques créés en un point M de l'espace

Je fais le point de l'activité

1- Caractéristiques du vecteur champ magnétique

Origine : le point M où est placé le milieu de l'aiguille aimantée.

Direction : celle de l'aiguille aimantée.

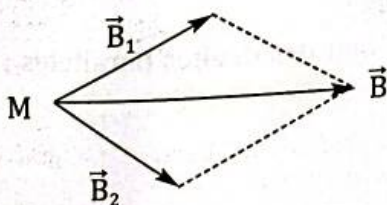
Sens : le sens sud-nord de l'aiguille aimantée ;

Intensité : elle se mesure avec un **teslamètre**. Elle s'exprime en **tesla (T)**.

L'intensité du champ magnétique dépend de la source de champ magnétique et de la distance à cette source.



2- Somme des deux vecteurs champs magnétiques en un point M.



$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$$

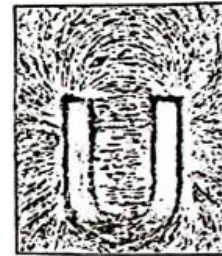
J'évalue mes acquis



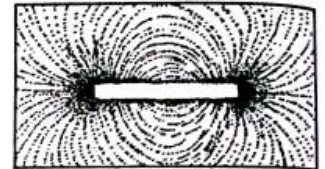
Soit deux vecteurs champs magnétiques $\vec{B}_1$ et $\vec{B}_2$ perpendiculaires entre eux, d'intensités respectives $B_1 = 0,02 \text{ T}$ et $B_2 = 0,04 \text{ T}$. Construis le vecteur champ magnétique résultant de $\vec{B}_1$ et $\vec{B}_2$ à l'échelle : $1 \text{ cm} \leftrightarrow 0,01 \text{ T}$.

ACTIVITÉ 4 : VISUALISER UN SPECTRE MAGNÉTIQUE

- 1- Dispose un aimant droit ou un aimant en "U" sur une plaque en plastique transparente.
- 2- Saupoudre, avec de la limaille de fer, la plaque transparente puis tapote-la (document 4).
- 3- Qu' observes-tu ?
- 4- Nomme les lignes formées par les grains de limaille.
- 5- Nomme l'ensemble formé par ces lignes.
- 6- Place des aiguilles aimantées sur la plaque, à divers endroits sur les lignes.
- 7- Représente le vecteur champ magnétique aux endroits où sont placées les aiguilles aimantées.
- 8- Donne la direction du vecteur champ magnétique par rapport à la ligne de champ.
- 9- Indique le sens des lignes de champ suivant le sens sud-nord (SN) de l'aiguille aimantée.



a

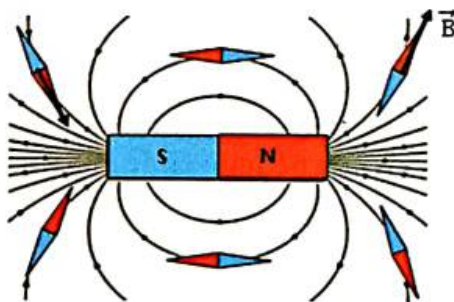


b

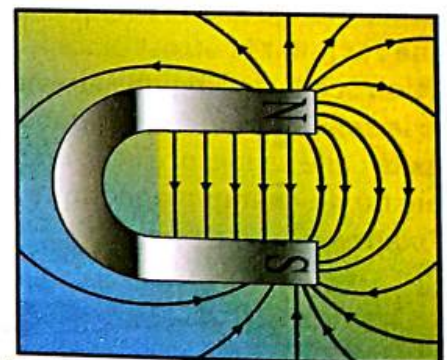
Document 4 : Spectres magnétiques

Je fais le point de l'activité

- 1- Les grains de limaille se comportent comme de petites boussoles en se disposant suivant des lignes courbes.
- 2- Ces lignes courbes sont appelées lignes de champ. L'ensemble des lignes de champ constituent le spectre magnétique de l'aimant.
- 3- Chaque type de source de champ magnétique est caractérisé par son spectre.
- 4- L'aiguille aimantée est tangente, au point M où elle est placée, à la ligne de champ. Le vecteur champ magnétique est donc tangent, en M, à la ligne de champ.
- 5- Les lignes de champ sont dans le sens sud-nord (SN). Elles sortent du pôle nord de l'aimant et entrent par le pôle sud.



Spectre magnétique d'un aimant droit



Spectre magnétique d'un aimant en "U"

À l'intérieur des branches de l'aimant en U, les lignes de champ sont des droites parallèles : le champ magnétique y est uniforme.

J'évalue mes acquis

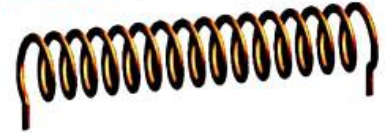


Recopie et complète les phrases ci-dessous.

- 1- La direction du vecteur champ magnétique en un point O est à la ligne de champ en ce point.
- 2- L'ensemble des lignes de champ constituent

ACTIVITÉ 5 : DÉCOUVRIR LE CHAMP MAGNÉTIQUE CRÉÉ PAR UN SOLÉNOÏDE

- 1- Donne la définition d'un solénoïde (document 5).
- 2- Fais passer un courant dans le solénoïde.
- 3- Réalise son spectre.
- 4- Énonce la règle de la main droite.
- 5- Exploite les données des tableaux suivants donnant les valeurs des champs magnétiques $\vec{B}$ en fonction de l'intensité I du courant dans chaque bobine.



Document 5 : Un solénoïde

 Bobine 1 : $\ell_1 = 0,5 \text{ m}$; $N_1 = 240$ spires

$$n_1 = \frac{N_1}{\ell_1} = 480 \text{ spires/m.}$$

I(A)	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
B(mT)	0,60	0,91	1,22	1,50	1,80	2,10	2,41

 Bobine 2 : $\ell_2 = 0,8 \text{ m}$; $N_2 = 768$ spires

$$n_2 = \frac{N_2}{\ell_2} = 960 \text{ spires/m.}$$

I(A)	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
B(mT)	1,25	1,9	2,5	3,1	3,75	4,4	5

- 6- Représente le vecteur champ magnétique en utilisant la règle de la main droite.
- 7- Trace les courbes $B = f(I)$ et montre que B est proportionnelle I , soit $B = K.I$ pour chaque bobine.
- Échelles : $1 \text{ cm} \rightarrow 1 \text{ A}$; $1 \text{ cm} \rightarrow 1 \text{ mT}$
- 8- Vérifie que les coefficients K sont proportionnels au nombre de spires par mètre n ($K = \mu_0.n$).
- 9- Dédus la relation : $B = \mu_0 n I$ où $n = \frac{N}{\ell}$.

Je fais le point de l'activité
1- Définition d'un solénoïde

 Un solénoïde est une bobine dont la longueur ℓ

 et le rayon r sont liés par la relation $\frac{\ell}{r} \geq 10$.

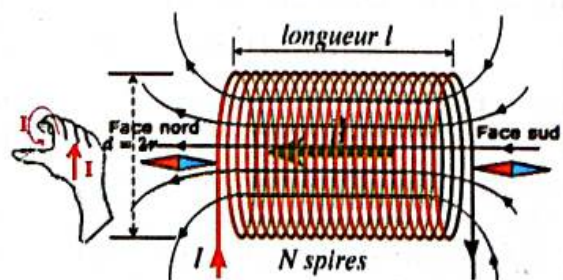
2- Spectre magnétique d'un solénoïde

Les lignes de champ à l'intérieur d'un solénoïde sont des droites parallèles. Le champ magnétique est donc uniforme à l'intérieur du solénoïde.

3- Règle de la main droite (voir figure)

- Le courant a le sens des quatre (4) premiers doigts réunis.
- Le pouce indique le sens des lignes de champ et aussi le sens du vecteur champ magnétique $\vec{B}$.

4- Courbe $B = f(I)$ et relation entre B et I

 Les courbes $B = f(I)$ sont des droites passant par l'origine du repère, B est proportionnelle à I , soit $B = KI$.


$$\text{Bobine 1 : } K_1 = \frac{\Delta B}{\Delta I} = \frac{(2,41-0,6) \times 10^{-3}}{4-1} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ T/A}$$

$$\text{bobine 2 : } K_2 = \frac{\Delta B}{\Delta I} = \frac{(5-1,25) \times 10^{-3}}{4-1}$$

$$K_2 = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ T/A}$$

• K est proportionnelle au nombre de spires n

$$\text{Bobine 1 : } \frac{K_1}{n_1} = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ SI}$$

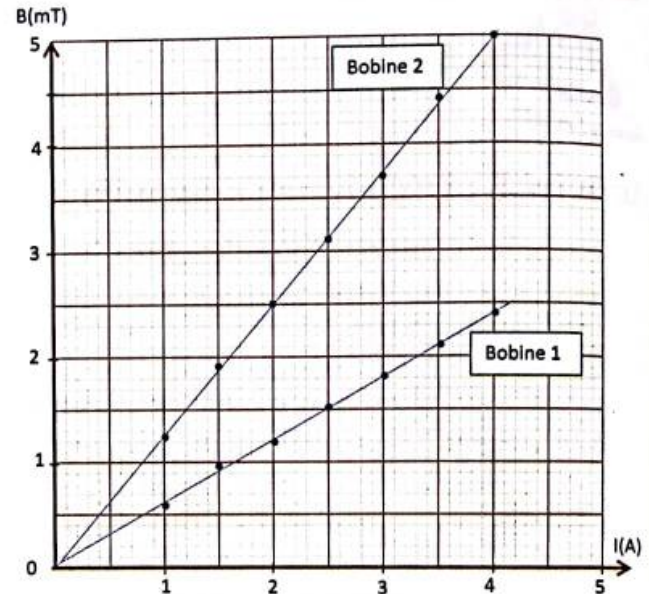
$$\text{Bobine 2 : } \frac{K_2}{n_2} = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ SI}$$

Aux erreurs de mesures près,

$$\frac{K_1}{n_1} = \frac{K_2}{n_2} = \text{cte} = \mu_0 \rightarrow K = \mu_0 n$$

$$\text{Donc } B = KI = \mu_0 nI \quad B = \mu_0 nI = \mu_0 \frac{N}{\ell} I$$

μ_0 , est la perméabilité du vide, aussi appelée perméabilité magnétique du vide ou constante magnétique. Sa valeur est : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ SI}$.



J'évalue mes acquis



Un solénoïde comportant $n = 2000$ spires/m est parcouru par un courant d'intensité $I = 3 \text{ A}$.

Donnée : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ SI}$.

L'intensité du vecteur champ magnétique à l'intérieur du solénoïde est :

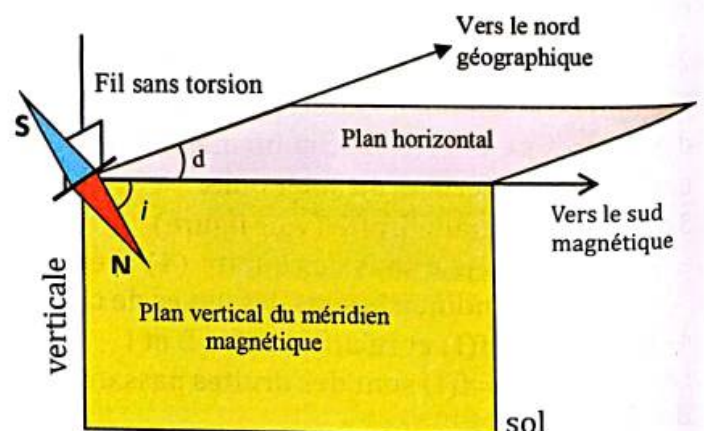
- $1,25 \cdot 10^{-3} \text{ T}$;
- $2 \cdot 10^{-3} \text{ T}$;
- $7,5 \cdot 10^{-3} \text{ T}$

Choisis la bonne réponse.

ACTIVITÉ 6 : DÉTERMINER LES COMPOSANTES HORIZONTALE ET VERTICALE DU VECTEUR CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE

Suspends une aiguille aimantée, par son centre de gravité à un fil sans torsion, en l'absence d'une source de champ magnétique.

- Indique l'orientation de l'aiguille aimantée.
- Déduis-en l'existence du champ magnétique de la Terre.
- Représente le vecteur champ magnétique terrestre dans le plan vertical du méridien magnétique.
- Représente ses composantes horizontale et verticale.



Document 6 : Mise en évidence du champ magnétique terrestre

e fais le point de l'activité

1- Direction de l'aiguille aimantée

L'aiguille aimantée, mobile autour de l'axe vertical, oriente son pôle nord vers le sud magnétique. Toute aiguille aimantée rendue mobile se dispose toujours dans la même direction.

2- Champ magnétique terrestre

Il existe un champ magnétique terrestre que l'aiguille aimantée détecte en s'orientant toujours dans la même direction et le même sens.

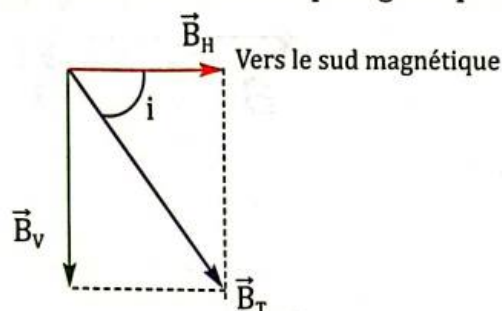
Le pôle nord de l'aiguille aimantée pointe vers le sud magnétique de la Terre (proche du sud géographique).

L'angle i entre la direction du nord géographique et celle du nord magnétique est appelé **déclinaison**. On note que l'aiguille aimantée ne se dispose pas exactement dans le plan horizontal contenant le nord géographique et le sud magnétique ; il s'incline vers la verticale du lieu.

On en déduit que le champ magnétique terrestre comporte deux composantes : une composante horizontale et une composante verticale.

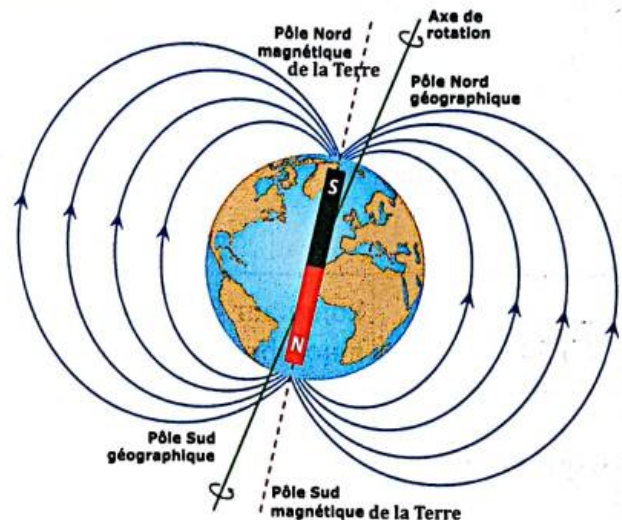
La composante horizontale du champ magnétique terrestre a pour valeur : $B_H = 2.10^{-5} \text{ T}$.

3- Représentation du vecteur champ magnétique terrestre



$\vec{B}_H$: composante horizontale du vecteur champ magnétique terrestre.

$\vec{B}_V$: composante verticale du vecteur champ magnétique terrestre. $\vec{B}_T = \vec{B}_H + \vec{B}_V$



J'évalue mes acquis



Réponds par vrai ou faux aux affirmations ci-dessous.

- 1- Le pôle sud d'une aiguille aimantée mobile pointe vers le nord magnétique de la Terre.
- 2- Le vecteur champ magnétique terrestre a deux composantes.
- 3- Une aiguille aimantée, mobile autour d'un axe vertical, indique la direction de la composante horizontale du champ magnétique terrestre.
- 4- La valeur du champ magnétique terrestre est $B = 2.10^{-5} \text{ T}$

II- RÉSUMÉ DE COURS

• Sources de champ magnétique

Un aimant, un conducteur parcouru un courant, la Terre, sont des sources de champ magnétique. On peut détecter un champ magnétique à l'aide d'une aiguille aimantée.

• Vecteur champ magnétique : le champ magnétique est associé en tout point à un vecteur champ magnétique $\vec{B}$.

Les caractéristiques de $\vec{B}$ sont :

- direction : celle d'une aiguille aimantée placée dans le champ ;
- sens : sud-nord de l'aiguille aimantée ;
- intensité exprimée en tesla (T).

• Spectre magnétique

L'ensemble des lignes de champ constitue le spectre magnétique. Chaque spectre est caractéristique de la source de champ magnétique.

Le vecteur champ magnétique est tangent à la ligne de champ en chacun de ses points.

Un solénoïde est une bobine dont la longueur ℓ et le rayon r sont reliés par la relation $\frac{\ell}{r} \geq 10$.

La valeur du vecteur champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde a pour expression $B = \mu_0 nI = \mu_0$

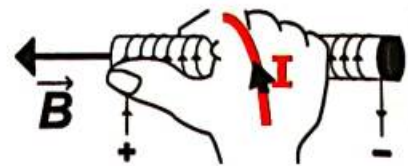
• Champ magnétique terrestre

Le vecteur champ magnétique terrestre a deux composantes $\vec{B}_V$ et $\vec{B}_H$ telles que : $\vec{B}_T = \vec{B}_H + \vec{B}_V$

III- MÉTHODES

1- Règle de la main droite

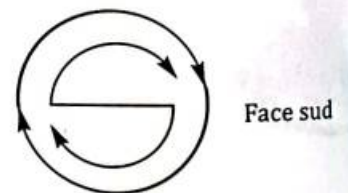
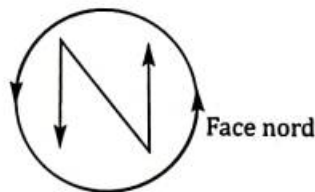
Le pouce indique le sens du vecteur champ magnétique



2- Expression du nombre N de spires d'un solénoïde

Données	Longueur ℓ du solénoïde ; n nombre de spires/m	Longueur ℓ du solénoïde ; diamètre d du fil	Rayon r du solénoïde ; longueur L du fil
Expression de N	$N = n\ell$	$N = \frac{\ell}{d}$	$N = \frac{L}{2\pi r}$

3- Faces d'une bobine



IV- EXERCICES RÉSOLUS

Exercice 1

Un solénoïde, comportant $n = 2500$ spires/mètre, est parcouru par un courant d'intensité $I = 5$ A.
Donnée : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ SI.

L'intensité du champ magnétique au centre du solénoïde est :

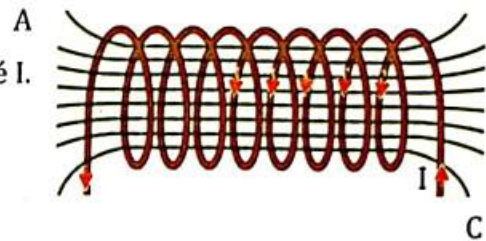
- a) 18,5 mT ;
- b) 15,7 mT ;
- c) 12,7 mT.

Choisis la bonne réponse

Exercice 2

Un solénoïde est parcouru par un courant électrique d'intensité I .

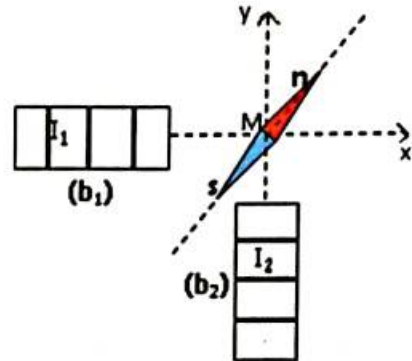
- 1- Donne le sens de quelques lignes de champ magnétique.
- 2- Identifie les faces A et C du solénoïde.



Exercice 3

Deux bobines (b_1) et (b_2) sont parcourues par des courants d'intensités I_1 et I_2 respectives telles que $I_1 = I_2$. Ces courants créent respectivement deux champs magnétiques, $\vec{B}_1$ et $\vec{B}_2$, en un point M de l'espace. Une aiguille aimantée, placée en ce point, donne la direction et le sens du champ magnétique résultant $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$.

- 1- Représente les champs magnétiques $\vec{B}$, $\vec{B}_1$ et $\vec{B}_2$.
- 2- Donne les sens des courants dans les bobines.



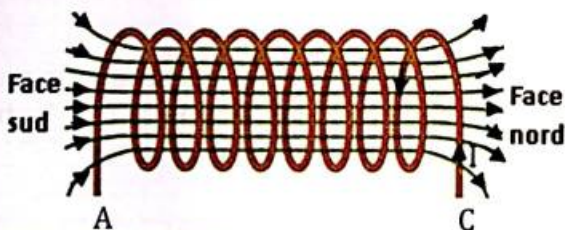
Résolution de l'exercice 1

Commentaire :

Utiliser la relation $B = \mu_0 n I$

$$B = 15,7 \text{ mT}$$

Résolution de l'exercice 2



Commentaire :

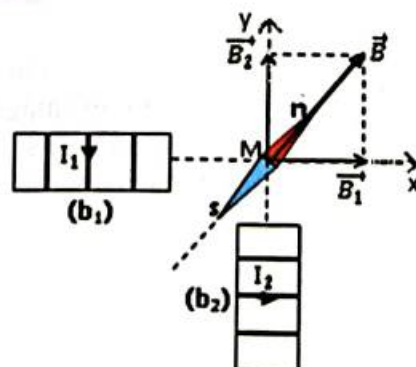
Le sens des lignes de champ est donné par la règle de la main droite : le pouce indique le sens des lignes de champ.

Les lignes de champ entrent par la face sud et sortent par la face nord.



Résolution de l'exercice 3

Voir dessin ci-contre



Commentaire :

$\vec{B}$ est de même direction et de même sens que l'aiguille aimantée (SN). $\vec{B}_1$ est obtenu en projetant $\vec{B}$ sur l'axe (M, x).

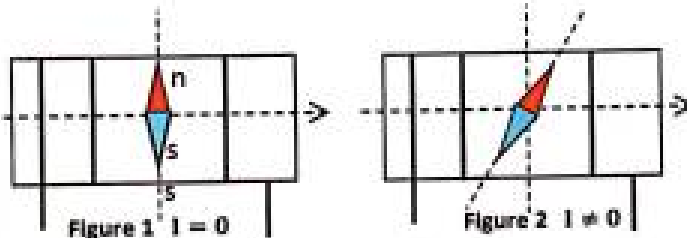
$\vec{B}_2$ est obtenu en projetant $\vec{B}$ sur l'axe (M, y).

Les sens de I_1 et I_2 sont donnés par la règle de la main droite.

V- JE M'EXERCE

Exercices de fixation/ Application

1 On place une aiguille aimantée à l'intérieur d'une bobine traversée par un courant d'intensité I . Si $I = 0$ A, l'aiguille prend une direction perpendiculaire à l'axe $x'x$ de la bobine (figure 1). Si $I \neq 0$ A, l'aiguille dévie d'un angle α (figure 2).



Reproduis la figure 2 et représente :

- 1- $\vec{B}_H$: la composante horizontale du champ magnétique terrestre ;
- 2- $\vec{B}_1$: le champ magnétique créé par le courant dans la bobine ;
- 3- $\vec{B}$: le champ magnétique résultant ; le sens du courant.

2 Soit les affirmations ci-dessous.

- 1- Un fil de cuivre est une source de champ magnétique.
- 2- Un fil de cuivre parcouru par un courant est une source de champ magnétique.
- 3- La Terre est une source de champ magnétique.
- 4- Une bobine en cuivre parcourue par un courant est une source de champ magnétique.
- 5- Un aimant en U est une source de champ magnétique.

Écris, pour chacune des affirmations, le numéro suivi de la lettre V si l'affirmation est vraie ou de la lettre F si elle est fausse.

3 Un solénoïde, de longueur ℓ , comportant N spires, est parcouru par un courant d'intensité I . Soit $\vec{B}$ le vecteur champ magnétique au centre de la bobine, d'intensité B .

1- La direction de $\vec{B}$:

- a) est perpendiculaire à l'axe de la bobine ;
- b) est parallèle à l'axe de la bobine ;
- c) fait un angle de 30° avec l'axe de la bobine.

2- Le sens de $\vec{B}$ est tel que :

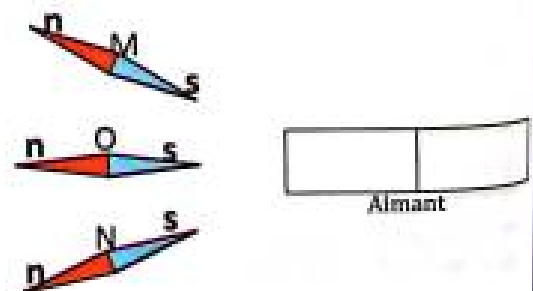
- a) $\vec{B}$ est dirigé dans le sens sud-nord des faces de la bobine ;
- b) $\vec{B}$ est dirigé dans le sens nord-sud des faces de la bobine ;
- c) $\vec{B}$ est dirigé du haut vers le bas.

3- L'intensité de $\vec{B}$ est :

- a) $B = \mu_0 NI$;
- b) $B = \frac{\mu_0 N}{\ell} I$;
- c) $B = \mu_0 \frac{N}{\ell} I$

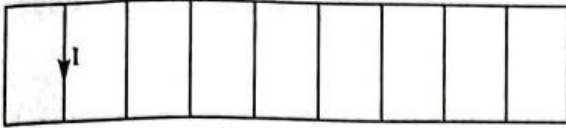
Écris, pour chacune des propositions, le numéro suivi de la lettre correspondant à la bonne réponse.

4 Près d'un aimant, on place des aiguilles aimantées aux points M, O et N



- 1- Reproduis le schéma et représente les vecteurs champs magnétiques aux points M, O et N.
- 2- Indique les pôles de l'aimant.

5 Une bobine, comportant n spires/mètre, est parcourue par un courant d'intensité I



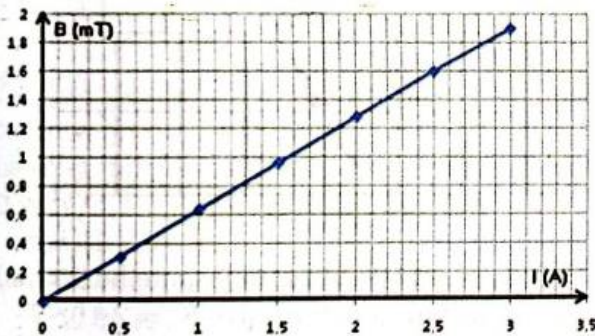
- 1- Reproduis le schéma ci-dessus et représente quelques lignes de champ et indique leurs sens.
- 2- Indique les noms des faces (sud et nord) de la bobine.
- 3- Représente le champ magnétique $\vec{B}_0$ au centre O de la bobine.
- 4- Donne l'expression de l'intensité B_0 en fonction de n et I .

6 Soit des affirmations ci-dessous.

- 1- Les lignes de champ magnétique d'un aimant sortent par le pôle sud et rentrent par le pôle nord.
 - 2- Deux lignes de champ ne peuvent pas se croiser.
 - 3- Le champ magnétique est uniforme à l'intérieur d'une bobine.
 - 4- A l'intérieur d'une bobine les lignes de champ sont des droites parallèles.
- Écris, pour chacune de ces affirmations, le numéro suivi de la lettre V si l'affirmation est vraie ou de la lettre F si elle est fausse.

Exercices de renforcement/ Approfondissement

7 Soit la valeur B du champ magnétique, créé en son centre, par un solénoïde comportant $N = 200$ spires et traversée par un courant d'intensité I . Le tracé de B en fonction de I donne la courbe ci-dessous.



Donnée :

Constante magnétique : $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ SI}$

- 1- Détermine la pente K de la droite obtenue.
- 2- Détermine le nombre n de spires par mètre.
- 3- Détermine la longueur ℓ du solénoïde.

8 Un solénoïde de longueur $\ell = 60 \text{ cm}$ est constitué d'un fil gainé de diamètre $d = 2 \text{ mm}$, enroulé sur un cylindre de matière plastique en 4 couches de spires jointives. L'intensité du courant qui parcourt le solénoïde est $I = 2 \text{ A}$

- 1- Détermine le nombre de spires sur une (1)

couche, puis sur l'ensemble des quatre (4) couches.

- 2- Détermine la valeur du champ magnétique à l'intérieur du solénoïde.

9

- 1- Un solénoïde de longueur $\ell_1 = 50 \text{ cm}$, comportant $N_1 = 250$ spires est traversé par un courant d'intensité électrique $I_1 = 2,5 \text{ A}$.

Détermine la valeur du champ magnétique $\vec{B}_1$ au centre du solénoïde

- 2- Un deuxième solénoïde génère un champ magnétique $B_2 = 5,0 \text{ mT}$, lorsqu'il est traversé par un courant d'intensité $I_2 = 2,5 \text{ A}$.

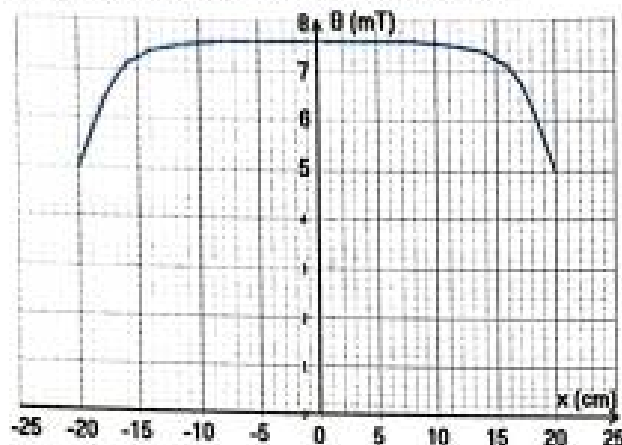
Calcule le nombre n_2 de spires par mètre qu'il comporte.

- 3- Un troisième solénoïde, de longueur $\ell_3 = 80 \text{ cm}$, comporte $n_3 = 1500$ spires par mètre. Il est traversé par un courant d'intensité $I_3 = 1,2 \text{ A}$.

Détermine la valeur B_3 du champ magnétique $\vec{B}_3$ au centre de ce solénoïde.

- 4- Un dernier solénoïde de longueur ℓ_4 , comportant $N_4 = 1500$ spires génère un champ magnétique de valeur $B_4 = 7,5 \text{ mT}$ lorsqu'il est parcouru par un courant électrique d'intensité $I_4 = 3,0 \text{ A}$. Détermine la longueur ℓ_4 .

10 Un point M de l'axe d'un solénoïde est repéré par son abscisse $x = OM$ par rapport au centre O. La figure ci-dessous représente la valeur B du champ magnétique $\vec{B}$ en fonction de x.



- 1- Calcule la valeur de B correspondant à l'erreur de 5% en utilisant la relation :

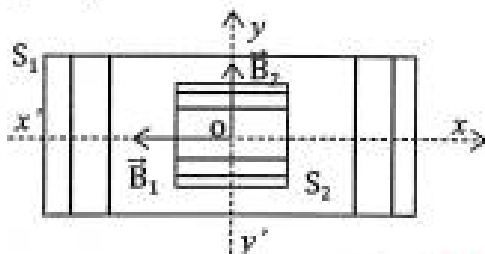
$$\beta = \frac{B_0 - B}{B_0} = \frac{5}{100}$$

- 2- Détermine graphiquement, les abscisses x et -x correspondant à la valeur de B calculée.
- 3- Dédus la distance d, autour de O pour laquelle B est constant avec une erreur de 5%.

11 A l'intérieur d'un solénoïde S_1 comportant n_1 spires/m, parcouru par un courant d'intensité I_1 , on place un solénoïde S_2 dont l'axe est orthogonal à celui de S_1 , comportant n_2 spires/m et parcouru par un courant d'intensité I_2 .

Soit $\vec{B}_1$ le vecteur champ magnétique créé par le courant qui traverse S_1 et soit $\vec{B}_2$ le vecteur champ magnétique créé par le courant qui traverse S_2 .

Le vecteur champ magnétique $\vec{B}$ résultant fait un angle $\alpha = 63,4^\circ$ avec l'axe $x'x$; $I_1 = 2 \text{ A}$; $I_2 = 1 \text{ A}$; $n_1 = 100 \text{ spires/m}$.



- 1- Reproduis le schéma et construis le vecteur champ magnétique résultant $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$.
- 2- Donne les sens des courants dans les solénoïdes.
- 3- Exprime $\tan \alpha$ en fonction de n_1 ; n_2 ; I_1 et I_2 .
- 4- Détermine n_2 .

12 On place une aiguille aimantée, à l'intérieur d'une bobine, dans le plan du méridien magnétique. En l'absence de courant, l'aiguille prend une direction perpendiculaire à l'axe $x'x$ de la bobine (figure 1). Lorsqu'on fait passer un courant d'intensité I dans la bobine l'aiguille dévie d'un angle α (figure 2).

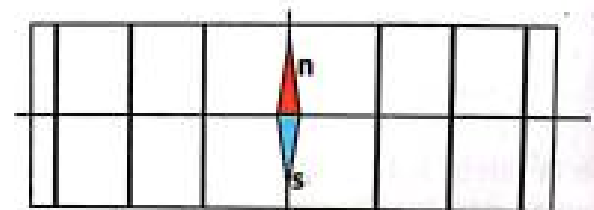


Figure 1

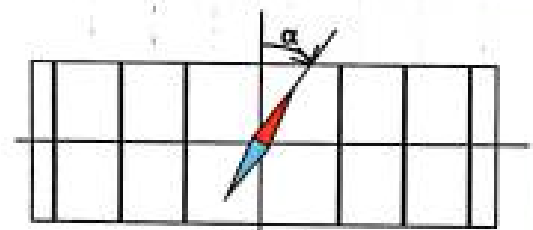


Figure 2

$\alpha = 36^\circ$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ SI}$; composante horizontale du champ magnétique terrestre $B_H = 2 \cdot 10^{-5} \text{ T}$

- 1- Donne la direction de la composante horizontale $\vec{B}_H$ du champ magnétique terrestre.
- 2- Détermine le sens du champ magnétique $\vec{B}_1$ créé par la bobine.
- 3- Détermine le sens du courant.
- 4- Calcule la valeur du champ magnétique créé par la bobine et celle du champ résultant $\vec{B}$.

Situations d'évaluation

13 Au cours d'une séance de travaux pratiques, ton groupe est choisi pour déterminer le nombre de spires par mètre d'un solénoïde.

Pour ce faire, à l'aide d'une sonde à effet Hall et d'un teslamètre, vous mesurez le champ magnétique à l'intérieur du solénoïde en fonction de l'intensité

I du courant. Vous obtenez les résultats suivants :

I(A)	0,15	0,25	0,36	0,49	0,58	0,92	1,18	1,37	1,59
B(mT)	0,20	0,34	0,48	0,67	0,79	1,28	1,64	1,92	2,22

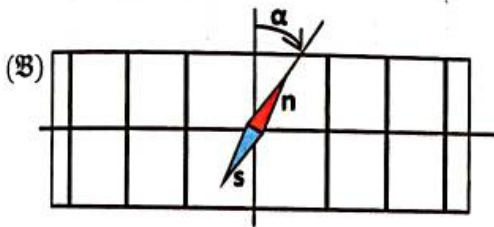
Données : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ SI}$; $N = 1000 \text{ spires}$.

Échelles pour la représentation : $1 \text{ cm} \leftrightarrow 0,5 \text{ mT}$ et $1 \text{ cm} \leftrightarrow 0,5 \text{ cm}$.

- 1- Définis un solénoïde.
- 2- Représente graphiquement, B en fonction de I .
- 3- Montre que B est proportionnelle à I , soit $B = KI$.
- 4- Détermine le nombre de spires par mètre $n = \frac{N}{\ell}$ du solénoïde.

11 Au cours d'une séance de Travaux Pratiques, le professeur de Physique demande à ton groupe de déterminer la valeur de la composante horizontale $\vec{B}_H$ du champ magnétique terrestre.

- Vous placez une aiguille aimantée, sur pivot vertical, à l'intérieur d'un solénoïde, elle s'oriente perpendiculairement à l'axe du solénoïde en l'absence de courant ;
- Lorsque le courant d'intensité I circule, l'aiguille tourne d'un angle α par rapport à la position initiale.



Tu es désigné (e) pour la rédaction du compte-rendu.

Le solénoïde de longueur ℓ , comporte N spires

Données: $I = 8 \text{ mA}$; $N = 800$ spires ;

$\ell = 40 \text{ cm}$

- 1- Reproduis le schéma et représente :
 - 1.1- le vecteur champ magnétique $\vec{B}$ créé par le courant dans le solénoïde $\mathfrak{B}$;
 - 1.2- la composante horizontale du champ magnétique terrestre $\vec{B}_H$;
 - 1.3- le vecteur champ magnétique résultant $\vec{B}_R$.
- 2- Donne l'expression de la valeur B du vecteur champ $\vec{B}$ en fonction de I , ℓ , N et μ_0 .
- 3- Exprime B_H en fonction de $\tan \alpha$ et de B .
- 4- Détermine :
 - 4.1- la valeur de $\tan \alpha$ pour laquelle $B = B_H$;
 - 4.2- la valeur de la composante horizontale du champ magnétique terrestre.

15 Le professeur demande à ton groupe d'exploiter le document ci-dessous pour déterminer la valeur du champ magnétique terrestre.

Sur la figure 1, une aiguille aimantée, suspendue à un fil, s'incline vers le bas et prend une direction faisant un angle θ avec l'horizontale.

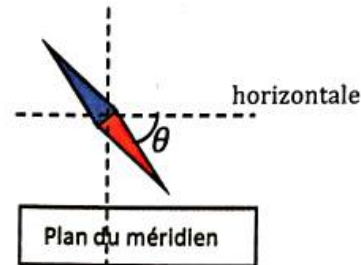


Figure 1

Sur la figure 2, l'aiguille aimantée est placée sur un pivot vertical, au centre O d'une bobine. Quand aucun courant ne circule dans la bobine, la direction prise par l'aiguille aimantée est perpendiculaire à l'axe de la bobine.

On établit un courant dans la bobine. L'aiguille tourne d'un angle α .

Soit B_0 la valeur du champ magnétique créé par le courant dans la bobine.

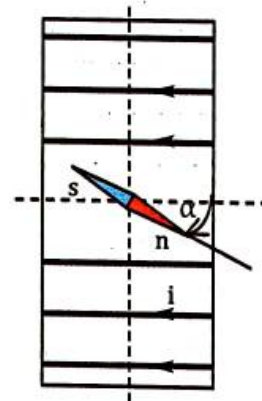


Figure 2

Données : $B_0 = 5.10^{-5} \text{ T}$; $\theta = 64,5^\circ$; $\alpha = 68^\circ$.

- 1- Reproduis le schéma de la figure 1 et représente le vecteur champ magnétique terrestre $\vec{B}_T$ ainsi que ses composantes horizontale $\vec{B}_H$ et verticale $\vec{B}_V$.
- 2- Exprime B_T en fonction de B_H et θ .
- 3- Reproduis le schéma de la figure 2 et représente le vecteur champ résultant $\vec{B}$ ainsi que ses composantes $\vec{B}_0$ et $\vec{B}_H$.
- 4- Dédus la valeur de $\vec{B}_T$.

VI- RENDEZ-VOUS DES CURIEUX

LES AURORES POLAIRES



Comment les aurores polaires se produisent-elles ?

Selon les scientifiques, ce phénomène est le résultat de la collision de particules chargées énergétiquement avec des atomes en atmosphère de haute altitude. **Ce vent solaire est ensuite dirigé dans l'atmosphère par le champ magnétique de la Terre.**

Une tempête géomagnétique est une partie importante des conditions météorologiques de l'espace. Elle est causée par une onde de choc du **vent solaire** ou **nuage de champ magnétique**. Elle est causée par la perturbation temporaire magnétique dans un milieu interplanétaire.

Les aurores polaires sont des particules chargées en provenance du Soleil, mais aussi d'autres étoiles, balaient le système solaire. Ce sont les « vents stellaires », dans lesquels on trouve notamment des électrons. Ces électrons peuvent pénétrer dans l'atmosphère terrestre et entrer en collision avec des atomes d'oxygène ou d'azote, leur transférant partiellement leur énergie. Cette énergie est ensuite rayonnée sous forme lumineuse lorsque ces atomes se dés excitent, provoquant parfois de magnifiques spectacles d'illumination du ciel, visibles de la surface de la Terre, généralement dans les régions polaires.

LEÇON

6

MOUVEMENT D'UNE PARTICULE CHARGÉE DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE UNIFORME

TABEAU DES HABILETÉS ET DES CONTENUS

HABILETÉS	CONTENUS
Définir	la force de Lorentz.
Connaître	- l'expression de la force de Lorentz ; - les règles d'orientation de la force de Lorentz.
Représenter	la force de Lorentz $\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$.
Déterminer	les caractéristiques de la force de Lorentz.
Déterminer	la nature d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme (cas particulier où $\vec{B} \perp \vec{v}$).
Connaître	l'expression du rayon de la trajectoire d'une particule chargée en mouvement dans un champ magnétique uniforme. $R = \frac{mv}{ q B}$
Utiliser	la relation $R = \frac{mv}{ q B}$.
Déterminer	la déflexion magnétique.
Analyser	le mouvement d'une particule chargée dans : - un spectromètre de masse ; - un cyclotron ; - un filtre de Wien ou filtre de vitesse.

NOTIONS ESSENTIELLES

- Force de Lorentz $\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$
- Rayon de la trajectoire : $R = \frac{mv}{|q|B}$
- Déflexion magnétique
- Spectromètre de masse
- Cyclotron
- Filtre de Wien ou filtre de vitesse

SITUATION D'APPRENTISSAGE

Un élève d'une classe de Terminale scientifique d'un Lycée a assisté à un documentaire diffusé sur une chaîne de télévision. Ce documentaire explique l'intérêt de la déviation d'un faisceau d'électrons dans un champ magnétique, pour l'identification des composés à l'aide des spectromètres de masse et pour l'accélération des particules par les cyclotrons. Afin d'approfondir les explications données dans ce documentaire, en classe, sous la supervision de leur professeur, les élèves décident de définir la force de Lorentz, de déterminer ses caractéristiques et d'analyser le mouvement d'une particule chargée dans un spectromètre de masse, dans un cyclotron et dans un filtre de Wien.



I- ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1 : DÉFINIR LE PRODUIT VECTORIEL ET SES PROPRIÉTÉS

- 1- Définis le produit vectoriel de deux vecteurs $\vec{V}_1$ et $\vec{V}_2$.
- 2- Donne les caractéristiques du vecteur résultant $\vec{V}$ d'un produit vectoriel : sa direction, son sens et sa norme ou valeur.
- 3- Donne les règles d'orientation permettant de retrouver la direction du vecteur résultant d'un produit vectoriel.

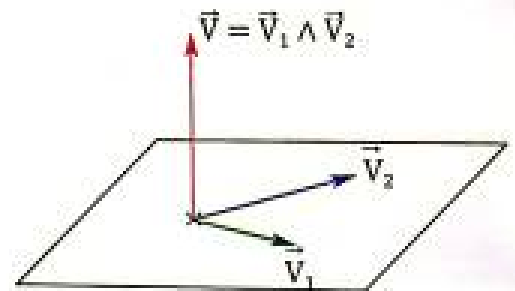
Je fais le point de l'activité

1- Définition

Le produit vectoriel de deux vecteurs $\vec{V}_1$ et $\vec{V}_2$ est le vecteur $\vec{V}$ noté : $\vec{V} = \vec{V}_1 \wedge \vec{V}_2$.

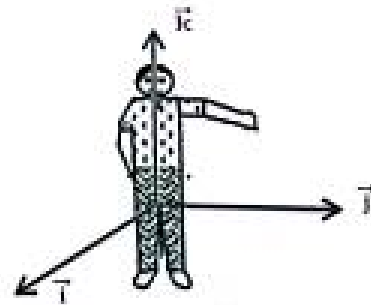
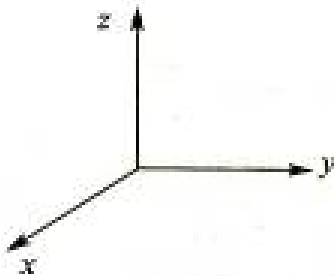
Les caractéristiques de $\vec{V}$ sont :

- direction : $\vec{V}$ perpendiculaire au plan formé par $\vec{V}_1$ et $\vec{V}_2$;
- sens : il est tel que le trièdre $(\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V})$ est direct ;
- valeur : $V = V_1 V_2 |\sin(\widehat{\vec{V}_1, \vec{V}_2})|$.

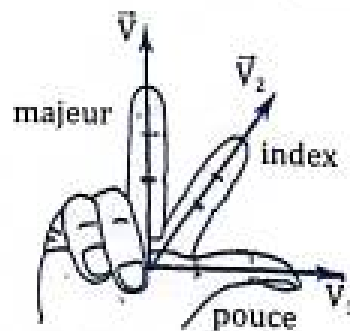


2- Règles d'orientation :

Le sens du trièdre $(\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V})$ est donné par la règle du bonhomme d'Ampère (document 2) ou la règle des trois doigts de la main droite ($\vec{V}_1$: le pouce, $\vec{V}_2$: l'index et $\vec{V}$: le majeur de la main droite) (document 3).



Document 2 : Règle du bonhomme d'Ampère



Document 3 : Règle des trois doigts de la main droite

Cas particuliers :

- Si $\vec{V}_1 // \vec{V}_2 \Rightarrow |\sin(\widehat{\vec{V}_1, \vec{V}_2})| = 0 \Rightarrow V = 0$
- Si $\vec{V}_1 \perp \vec{V}_2 \Rightarrow |\sin(\widehat{\vec{V}_1, \vec{V}_2})| = 1 \Rightarrow V = V_1 \cdot V_2$

Notation :

$\vec{V} \otimes$ signifie que $\vec{V}$ est entrant ; $\vec{V} \odot$ signifie que $\vec{V}$ est sortant.

J'évalue mes acquis

Représente le vecteur $\vec{V}$ tel que $\vec{V} = \vec{V}_1 \wedge \vec{V}_2$ dans chacun des cas ci-dessous.

1- $\vec{V}_2 \otimes \longrightarrow \vec{V}_1$

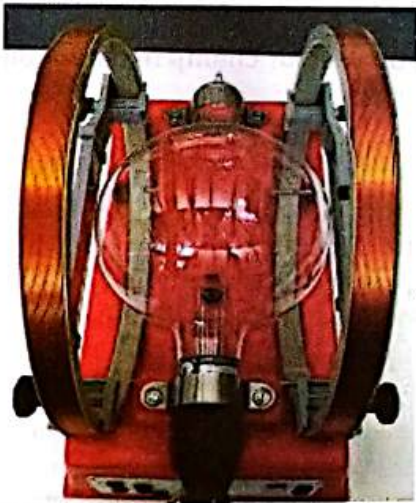
2- $\vec{V}_2 \odot \longrightarrow \vec{V}_1$

3- $\vec{V}_1 \longleftarrow$
 $\vec{V}_2 \downarrow$

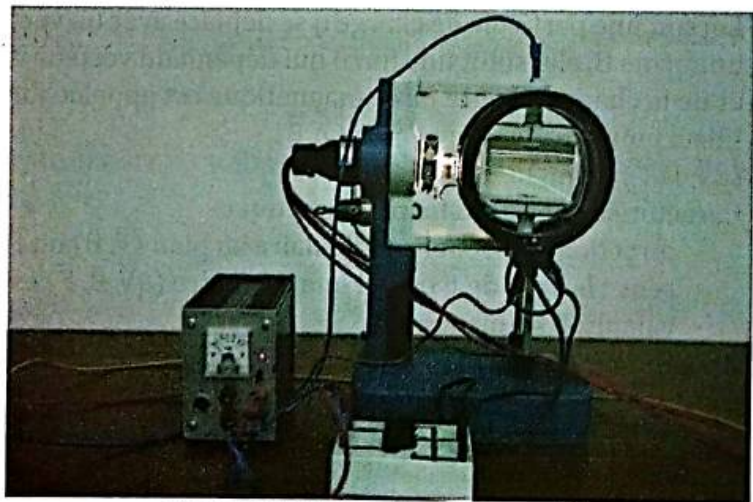
4- $\vec{V}_2 \otimes$
 $\vec{V}_1 \nearrow$

ACTIVITÉ 2 : METTRE EN ÉVIDENCE LA FORCE DE LORENTZ

Ton professeur dispose d'un tube à faisceau d'électrons entre des bobines de Helmholtz (Document 4).



Document 4 : Bobines d'Helmholtz



Document 5 : Interaction -faisceau d'électrons

À l'aide d'une source de tension adaptée, le professeur fait arriver un faisceau d'électrons dans le tube. Il établit ensuite le courant électrique dans les bobines (document 5), puis il fait tourner l'ampoule de manière à modifier la direction et le sens du vecteur vitesse initial $\vec{V}_0$ des électrons.

- 1- Note la trajectoire des électrons en absence de courant électrique dans les bobines.
- 2- Note tes observations lorsque :
 - 2.1- le courant électrique est établi dans les bobines ;
 - 2.2- le professeur fait tourner l'ampoule.
- 3- Interprète tes observations.
- 4- Conclue.

Je fais le point de l'activité

1- Observations



Les bobines de Helmholtz, parcourues par un courant électrique, créent un champ magnétique $\vec{B}$ uniforme dans l'ampoule de verre.

En absence de courant électrique dans les bobines de Helmholtz, la trajectoire des électrons est rectiligne.

Cette trajectoire s'incurve dans le plan parallèle à celui des bobines lorsqu'on alimente les bobines.

2-Interprétation

En présence de courant électrique dans les bobines, les électrons subissent une action mécanique. Cette action mécanique ou force est liée à la présence du champ magnétique $\vec{B}$. Elle est située dans un plan normal à $\vec{B}$. Cette force est plus importante lorsqu'on augmente la tension accélératrice des électrons, c'est-à-dire leur vitesse.

Lorsque $\vec{B} \parallel \vec{V}_0$: la force qui s'exerce sur les électrons est nulle ($\vec{F} = \vec{0}$) ; le mouvement des électrons est rectiligne et uniforme.

3- Conclusion

Lorsqu'une particule de charge q se déplace avec un vecteur vitesse $\vec{V}$ dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$, elle subit une force qui dépend du vecteur vitesse $\vec{V}$, du vecteur champ magnétique $\vec{B}$ et de la charge q . Cette force magnétique est appelée force de Lorentz.

Elle a pour expression : $\vec{F} = q\vec{V} \wedge \vec{B}$.

($q\vec{V}$, $\vec{B}$, $\vec{F}$) forment un trièdre direct.

Caractéristiques de la force magnétique :

- direction : $\vec{F}$ est perpendiculaire au plan ($\vec{V}$, $\vec{B}$) ou $\vec{F}$ est perpendiculaire à la fois à $\vec{V}$ et à $\vec{B}$;
- sens : le sens de $\vec{F}$ est tel que le trièdre ($q\vec{V}$, $\vec{B}$, $\vec{F}$) est direct ;
- valeur : $F = |q\sin\alpha|.VB$.

B s'exprime en tesla (T), q en coulomb (C) et V en m/s.

J'évalue mes acquis



Un proton pénètre avec un vecteur vitesse $\vec{v}$, dans une région de l'espace où règne un champ magnétique uniforme $\vec{B}$. La direction du vecteur vitesse fait un angle $\alpha = 30^\circ$ avec celle de $\vec{B}$.

1- Indique sur un schéma, la direction de la force $\vec{F}$ d'origine magnétique qui s'exerce sur le proton.

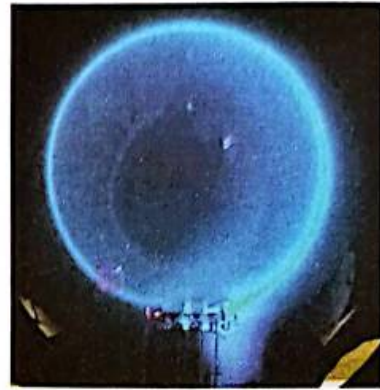
2- Détermine la valeur F de cette force.

Données : $v = 10^7$ m/s $B = 1,2$ T.

ACTIVITÉ 3 : ÉTUDIER LE MOUVEMENT D'UNE PARTICULE CHARGÉE DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE UNIFORME

Ton professeur reprend le dispositif précédent. Il se place dans le cas où le vecteur vitesse initiale $\vec{v}$ de la particule chargée pénétrant dans le champ uniforme est orthogonale au champ magnétique $\vec{B}$ uniforme.

- 1- Établis l'accélération du mouvement des électrons.
- 2- Décis le plan de la trajectoire des électrons.
- 3- Détermine la nature du mouvement des électrons.
- 4- Détermine la nature de la trajectoire des électrons.
- 5- Conclus.



Document 6 : Étude de la trajectoire des électrons lorsque la vitesse est perpendiculaire au champ magnétique

Je fais le point de l'activité

1- Accélération du mouvement des électrons

Chaque électron de masse m et de charge q pénètre dans le champ $\vec{B}$ uniforme avec un vecteur vitesse $\vec{v}_0$ perpendiculaire à $\vec{B}$.

Le poids $\vec{P}$ de l'électron est négligeable devant la force magnétique $\vec{F}$ qu'il subit.

Le théorème du centre d'inertie appliqué à l'électron dans le référentiel du laboratoire donne :

$$\vec{F} = q\vec{v}_0 \wedge \vec{B} = m\vec{a};$$

$$\vec{a} = \frac{q\vec{v}_0 \wedge \vec{B}}{m} = \frac{q}{m}\vec{v}_0 \wedge \vec{B}.$$

Compte tenu des propriétés du produit vectoriel, le vecteur $\vec{a}$ est constamment perpendiculaire au vecteur-vitesse $\vec{v}$ et au champ magnétique $\vec{B}$.

2- Plan de la trajectoire des électrons

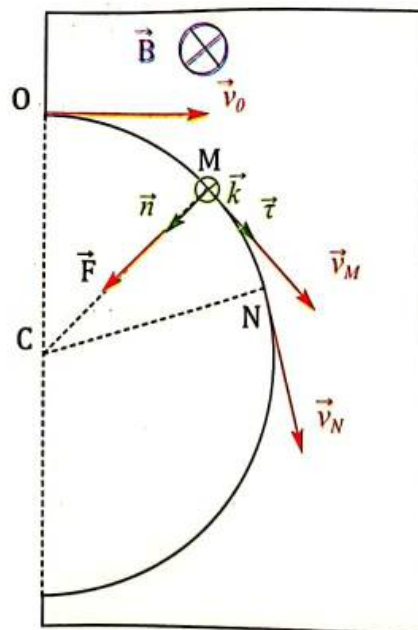
Soit l'axe (M, z) , parallèle au champ magnétique $\vec{B}$. Puisque $\vec{a} \perp \vec{B}$ et que $a_z = 0$, alors $v_z = 0$ car $\vec{v} \perp \vec{B}$; d'où $z = 0$.

Le mouvement de la particule s'effectue dans le plan contenant $\vec{v}_0$ et perpendiculaire à $\vec{B}$.

3- Nature du mouvement des électrons

À chaque instant, $\vec{F}$ est perpendiculaire à $\vec{v}$, donc la puissance $\mathcal{P} = \vec{F} \cdot \vec{v}$ de la force magnétique est nulle à chaque instant.

Puisque $\mathcal{P} = \frac{dW}{dt} = 0$, alors l'énergie cinétique E_c de la particule est constante, soit $v = \text{cte}$; $v = v_0 = \text{cte}$. Le mouvement de la particule est uniforme.



4- Nature de la trajectoire des électrons

Dans la base de Frenet (M, $\vec{\tau}$, $\vec{n}$), on a : $\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n = \frac{dv}{dt}\vec{\tau} + \frac{v^2}{\rho}\vec{n}$. Or $v = v_0 = \text{Cte}$ d'où $\frac{dv}{dt} = 0$
 ρ est le rayon de courbure de la trajectoire.

$\vec{a} = \vec{a}_n = \frac{v^2}{\rho}\vec{n}$: l'accélération de la particule est centripète.

$$\frac{q}{m}\vec{v}_0 \wedge \vec{B} = \frac{v^2}{\rho}\vec{n}$$

Puisque $\vec{v}$ reste orthogonal à $\vec{B}$, on obtient $\frac{|q|}{m}v.B = \frac{v^2}{\rho}$ soit $\rho = \frac{mv}{|q|B} = \text{cte}$

Le rayon de courbure ρ étant constant, il correspond au rayon du cercle : $R = \frac{mv}{|q|B}$

5- Conclusion

Une particule chargée qui pénètre dans un champ magnétique uniforme avec un vecteur vitesse perpendiculaire au champ magnétique a un mouvement circulaire et uniforme.

J'évalue mes acquis



Une particule chargée, pénètre avec un vecteur vitesse $\vec{v}_0$ dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ tel que $\vec{v}_0$ et $\vec{B}$ sont orthogonaux.

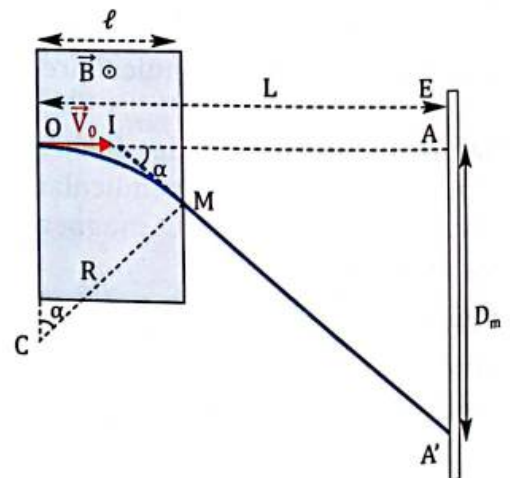
- 1- Le mouvement de la particule s'effectue dans le plan contenant $\vec{v}_0$ et perpendiculaire à $\vec{B}$.
- 2- Le mouvement de la particule est uniformément varié.
- 3- Le mouvement de la particule est circulaire et uniforme.
- 4- L'accélération de la particule est centrifuge.

Écris, pour chacune des affirmations, le numéro suivi de Vrai si l'affirmation est vraie ou de Faux si elle est fausse.

ACTIVITÉ 4 : ÉTABLIR L'EXPRESSION DE LA DÉFLEXION MAGNÉTIQUE

Une particule de charge q et de vecteur vitesse $\vec{v}_0$, pénètre en un point O dans une région restreinte de l'espace de largeur ℓ où règne un champ magnétique uniforme $\vec{B}$. Les vecteurs $\vec{v}_0$ et $\vec{B}$ sont orthogonaux. La trajectoire de la particule dans le champ $\vec{B}$ est un arc de cercle de rayon R . La particule sort du champ en M et alors, elle n'est soumise à aucune force. Son mouvement est de ce fait, rectiligne et uniforme. Le faisceau résultant vient frapper un écran en un point A'.

- 1- Donne l'expression de la déviation angulaire.
- 2- Détermine la déviation du point d'impact sur l'écran E en faisant les approximations suivantes :
 - la déviation α est faible ;
 - la longueur L est largement supérieure à ℓ .
- 3- Donne un autre nom de cette déviation.
- 4- Recherche une application de cette grandeur.



Document 6 : Déflection magnétique

Je fais le point de l'activité

1- Expression de la déviation angulaire.

En absence du champ magnétique, le faisceau frapperait l'écran situé à la distance L au point A . Les portions incidente (OA) et émergente (OA') de la trajectoire se coupent en un point I situé dans la région du champ et l'angle α entre ces portions est appelé angle de déviation.

$$\alpha = \frac{\widehat{OM}}{R}$$

2- Déviation magnétique ou déflexion magnétique

La déviation étant faible, $\widehat{OM} \approx \ell$ d'où $\alpha \approx \frac{\ell}{R}$ avec $R = \frac{mv_0}{|q|B}$ on a : $\alpha \approx \frac{\ell}{R} = \frac{\ell|q|B}{mv_0}$

La distance AA' qui est la déviation du point d'impact sur l'écran E s'obtient alors, pour L grand devant ℓ :

$$\tan \alpha \cong \alpha \cong \frac{AA'}{L - \frac{\ell}{2}} \cong \frac{AA'}{L}, \text{ d'où } AA' = L \cdot \alpha = \frac{\ell|q|BL}{mv_0}$$

Cette déviation est aussi appelée **déflexion magnétique** D_m . $D_m = \frac{\ell L|q|B}{mv_0}$

La déflexion magnétique est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique.

3-Application de la déflexion magnétique

La déflexion magnétique est utilisée dans les tubes cathodiques (de télévision). Elle est adaptée à la déviation des particules très rapides contrairement à la déflexion électrostatique

$$(D_e = \frac{D|q|\ell E}{2mv_0^2})$$

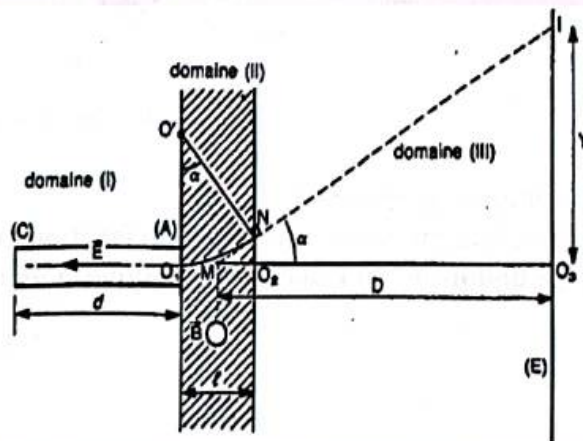
J'évalue mes acquis



Des électrons de masse m et de charge q sont émis sans vitesse initiale par une cathode (C). Ils subissent sur la longueur d , l'action d'un champ électrique uniforme $\vec{E}$. Arrivés en O_1 , les électrons subissent sur la distance ℓ , l'action d'un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ perpendiculaire au plan de la figure (le domaine où règne ce champ $\vec{B}$ est hachuré). Le domaine (III) est limité par un écran (E) sur lequel arrivent les électrons.

La droite IN coupe l'axe O_1O_2 au point M . L'écran (E) est à la distance D de ce point M . On fera les hypothèses simplificatrices suivantes :

- dans le domaine II de l'espace, on peut confondre la longueur de l'arc avec la longueur $O_1O_2 = \ell$ où règne le champ $\vec{B}$;
- la déviation angulaire est faible.



- 1- Détermine la vitesse V_0 d'un électron au point O_1 .
- 2- Indique le sens du vecteur champ magnétique $\vec{B}$ pour que les électrons décrivent l'arc de cercle $\widehat{O_1N}$.
- 3- Calcule le rayon $R = O'O_1 = O'N$ de cet arc de cercle.
- 4- Exprime en fonction de m , e , B , D , ℓ et V_0 , la déflexion magnétique $Y = O_3I$ subie par un électron à la traversée des domaines (II et III).
- 5- Sachant que $Y = 3,35$ cm, retrouve la valeur V_0 de la vitesse de l'électron au point O_1 .

Données : $B = 2.10^{-3}$ T ; $D = 40$ cm ; $\ell = 1$ cm ; $d = 10$ cm ; $m = 9,1.10^{-31}$ kg ;
 $E = 5.10^4$ V.m⁻¹.

On négligera le poids de l'électron devant les autres forces qui agissent sur lui.

ACTIVITÉ 5 : DÉCOUVRIR DES APPLICATIONS DU MOUVEMENT D'UNE PARTICULE CHARGÉE DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE UNIFORME

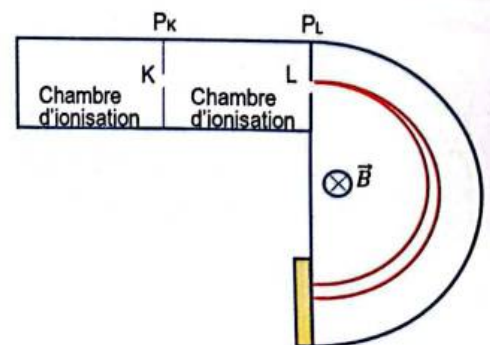
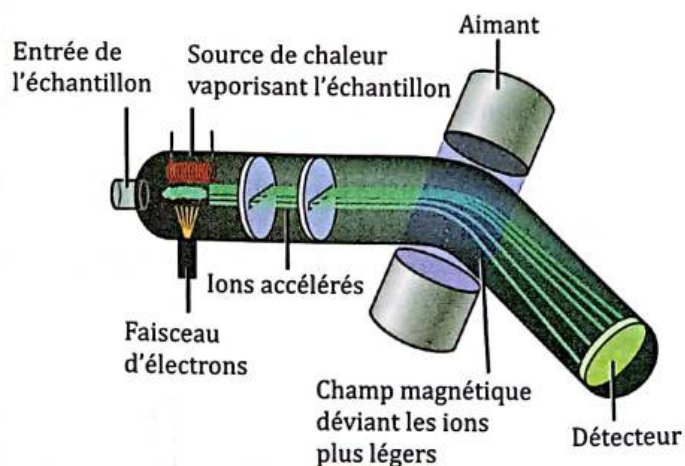
- 1- Effectue des recherches sur les applications du mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme.
- 2- Informe-toi sur le spectromètre de masse, le filtre de Wien et le cyclotron.

Je fais le point de l'activité

1- Le spectromètre de masse

C'est un appareil qui permet de séparer des isotopes d'un élément chimique.

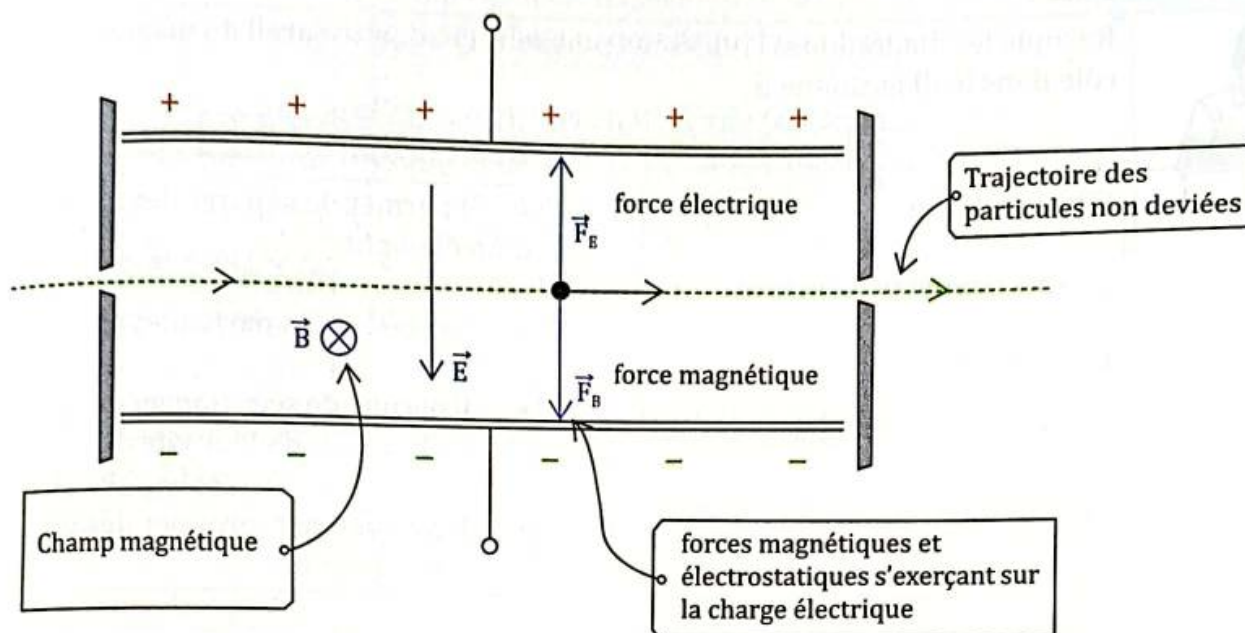
Une particule chargée, issue d'une chambre d'ionisation, est accélérée dans une chambre d'accélération, dans laquelle règne un champ électrique $\vec{E}$, puis pénètre dans un champ magnétique $\vec{B}$ d'une chambre de déviation où elle décrit un demi-cercle. La particule est enfin recueillie sur une plaque photographique appelée collecteur ou détecteur.



Document 8 : Spectromètre de masse

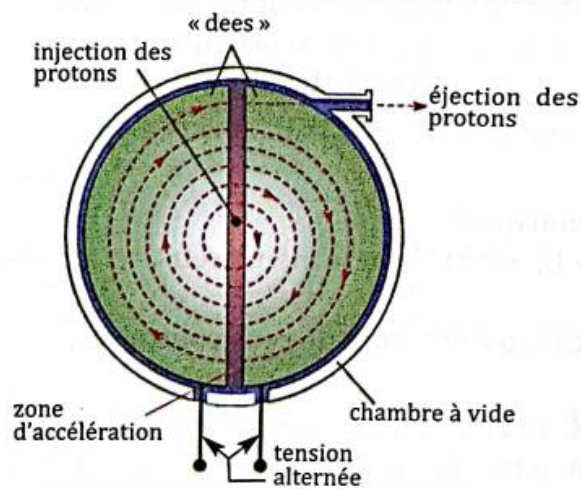
2- Filtre de vitesse ou filtre de Wien

Il permet de sélectionner des particules, en fonction de leur vitesse, grâce à la superposition de deux champs uniformes : un champ magnétique et un champ électrique.



3- Le cyclotron

C'est un accélérateur de particules chargées. Il est constitué de deux demi-cylindres plats appelés "dees", dans lesquels règne un champ magnétique uniforme, entre lesquels est appliquée une tension alternative. A chaque traversée de l'intervalle entre les "dees", la tension appliquée accélère les particules. Lorsque les particules sont à l'intérieur des "dees", elles décrivent des demi-cercles. Les particules arrivent à la périphérie des "dees", de rayon R et sortent tangentiellement à la trajectoire avec une grande vitesse après avoir fait généralement quelques centaines de tours.



Document 9 : Cyclotron

J'évalue mes acquis



Recopie les diagrammes ci-dessous puis relie chaque appareil du diagramme A à son rôle dans le diagramme B.

A

- Filtre de Wien •
- Le spectromètre de masse •
- Le cyclotron •

B

- Il permet de séparer des isotopes d'un élément.
- Il accélère les particules chargées.
- Il permet de sélectionner des particules en fonction de leur vitesse.
- Il permet de regrouper des isotopes d'un élément.

II- RÉSUMÉ DE COURS

• Définition et expression de la force de Lorentz

Une particule de charge q , se déplaçant avec un vecteur vitesse $\vec{V}$ dans un champ magnétique $\vec{B}$ est soumise à une force magnétique appelée force de Lorentz telle que :

$$\vec{F}_m = q\vec{V} \wedge \vec{B}$$

• Caractéristiques de la force de Lorentz

- direction : perpendiculaire au plan défini par $q\vec{V}$ et $\vec{B}$;
- sens : tel que le trièdre $(q\vec{V}, \vec{B}, \vec{F})$ est direct ;
- valeur : $F_m = |q|V.B.|\sin(\widehat{q\vec{V}, \vec{B}})|$.

Remarque :

$q > 0$, $q\vec{V}$ et $\vec{V}$ ont le même sens.



$q < 0$, $q\vec{V}$ et $\vec{V}$ sont de sens contraires.



• Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme

Une particule, de masse m et de charge q , en mouvement dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ avec une vitesse initiale $\vec{V}_0$ telle que $\vec{V}_0 \perp \vec{B}$ a un mouvement plan (orthogonal à $\vec{B}$), circulaire et uniforme.

Le rayon de sa trajectoire est $R = \frac{mv_0}{|q|B}$.

III- MÉTHODES

Comment déterminer la masse et la charge électrique d'une particule :

- La masse de deux nucléides isotopes A_1X et A_2X ($A_1 \neq A_2$) est pratiquement égale à celle de leurs noyaux et donnée par $m = A.u$ avec u : unité de masse atomique.

$$m({}^A_1X) = A_1u \text{ et } m({}^A_2X) = A_2u$$

$$\text{Exemple : } m({}^{35}_{17}\text{Cl}) = 35u \quad ; \quad m({}^{37}_{17}\text{Cl}) = 37u$$

- La charge électrique q des particules chargées :

La charge électrique d'un cation X^{n+} , est $q = n.e$ et celle d'un anion X^{n-} est $q = -n.e$ avec e , la charge élémentaire ($e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).

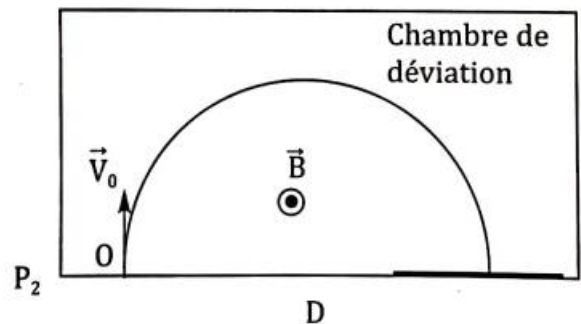
$$\begin{aligned} \text{Exemples : } q(\text{Ca}^{2+}) &= 2e & q(\text{Ca}^{2+}) &= 2 \times 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} & \Rightarrow & q(\text{Ca}^{2+}) = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C} \\ q(\text{N}^{3-}) &= -3e & q(\text{N}^{3-}) &= -3 \times 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} & \Rightarrow & q(\text{N}^{3-}) = -4,8 \cdot 10^{-19} \text{ C} \end{aligned}$$

IV- EXERCICES RÉSOLUS

Exercice 1

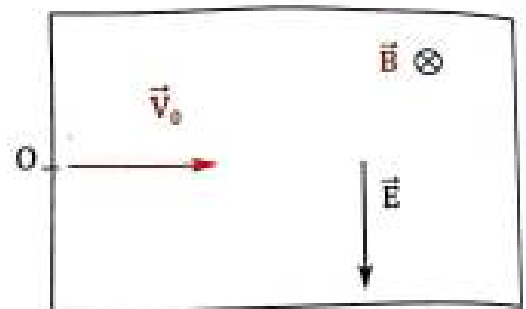
Une particule de masse m et de charge q ($q > 0$) pénètre en un point O dans une région de l'espace où règne un champ magnétique $\vec{B}$ uniforme. Le vecteur vitesse initiale $\vec{V}_0$ de la particule est perpendiculaire au vecteur champ magnétique $\vec{B}$. Le poids de la particule est négligé.

- 1- Fais l'inventaire des forces exercées sur la particule et établis l'expression de son vecteur-accelération $\vec{a}$.
- 2- Montre que :
 - 2.1- la trajectoire de la particule est plane ;
 - 2.2- le mouvement de la particule est uniforme ;
 - 2.3- la trajectoire de la particule est circulaire.
- 3- Établis l'expression de :
 - 3.1- la quantité de mouvement p de la particule en fonction de q , R et B ;
 - 3.2- la vitesse angulaire ω de la particule en fonction de m , q et B ;
 - 3.3- la période T du mouvement de la particule en fonction de m , q et B .



Exercice 2

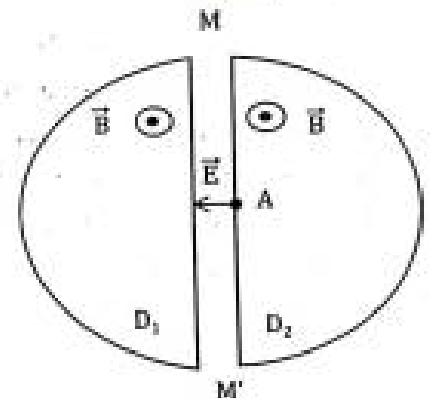
Une particule de charge q ($q > 0$) et de masse m pénètre avec un vecteur vitesse $\vec{V}_0$ en un point O dans une région où règne simultanément un champ magnétique $\vec{B}$ et un champ électrostatique $\vec{E}$, tous deux uniformes et orientés comme indiqués sur la figure. Le poids de la particule est négligeable devant les autres forces.



- 1- Fais l'inventaire des forces exercées sur la particule chargée.
- 2- Représente chacune de ces forces.
- 3- Établis l'expression de la vitesse V_0 de la particule en fonction de E et B pour que la trajectoire de la particule ne soit pas déviée.

Exercice 3

Lors d'une séance de travaux dirigés, votre professeur vous demande de déterminer l'expression de la vitesse maximale et de l'énergie cinétique maximale à la sortie d'un cyclotron. Ce cyclotron est constitué de deux demi-cylindres conducteurs creux D_1 et D_2 appelés les "dees", séparés par un intervalle étroit. Un champ magnétique $\vec{B}$ est créé dans D_1 et D_2 , parallèlement à l'axe des demi-cylindres. Un champ électrostatique $\vec{E}$ est créé dans l'intervalle étroit entre les "dees" D_1 et D_2 perpendiculairement à leur surface.



Le champ $\vec{E}$ nul à l'intérieur des "dees", créé par une tension alternative de fréquence f , permet de faire accélérer le mouvement des particules entre les "dees" à chaque passage.

Des protons pénètrent en A avec un vecteur vitesse $\vec{V}_0$ perpendiculaire au champ magnétique $\vec{B}$ et au diamètre des demi-cylindres. Le proton de masse m et de charge $q = e$, décrit un premier demi-tour et est ensuite accéléré par le champ $\vec{E}$ sous une tension U . A la sortie du "dee", les protons décrivent un cercle de même rayon R_0 que le rayon du "dee" avec une vitesse maximale $V_{\max}$. Le poids des protons est négligé devant les autres forces.

- 1- Donne l'expression du rayon R_1 du premier demi-cercle décrit par un proton.
- 2- Montre :
 - 2.1- que la durée Δt_1 de ce premier demi-tour est indépendante de la vitesse ;
 - 2.2- que $V_1 = V_0$.
- 3- Exprime :
 - 3.1- la vitesse V_2 à l'entrée du deuxième "dee" D_2 en fonction de m , e , U et V_0 ;
 - 3.2- le rayon R_2 du premier demi-cercle décrit par un proton ;
 - 3.3- la durée Δt_2 du deuxième demi-tour.
- 4- Établis l'expression :
 - 4.1- de la période T et la fréquence f du mouvement en fonction de m , e et B ;
 - 4.2- de la vitesse maximale $V_{\max}$ et de l'énergie cinétique maximale en fonction de m , e , B et R_0 .

Résolution de l'exercice 1

1-

Système : la particule de masse m .

Référentiel d'étude : référentiel terrestre supposé galiléen.

Bilan des forces :

 $\vec{F}_m$: Force de Lorentz. Le poids $\vec{P}$ est négligeable

Appliquons le théorème du centre d'inertie :

$$\sum \vec{F}_{\text{ext}} = m\vec{a} ; \vec{F}_m = m\vec{a}_G ; \vec{F}_m = q\vec{V} \wedge \vec{B} = m\vec{a}$$

$$\vec{a} = \frac{q\vec{V}_0 \wedge \vec{B}}{m}$$

2-

2.1- Montrons que la trajectoire est plane.

On munit l'espace du repère cartésien $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ et du repère de Frenet $(M, \vec{\tau}, \vec{n})$.

$$\text{On a : } \vec{a} = \frac{q\vec{V}_0 \wedge \vec{B}}{m} ; \vec{a} \perp \vec{B} \text{ or } \vec{B} = B\vec{k} \Rightarrow \vec{a}_z = 0$$

$$\Rightarrow V_z = V_{0z} \text{ or } \vec{V}_0 \perp \vec{B} ; V_{0z} = 0 \text{ donc } V_z = 0 ; z = z_0 = 0$$

à $t, z = 0$; le mouvement de la particule est plan et s'effectue dans le plan $(O, \vec{i}, \vec{j})$, orthogonal à $\vec{B}$.

2.2- Montrons que le mouvement est donc uniforme.

$$\mathcal{P}(\vec{F}_m) = \vec{F}_m \cdot \vec{v} = 0 \quad \vec{F}_m \perp \vec{v} = 0 \text{ d'où } \mathcal{P}(\vec{F}_m) = \frac{W(\vec{F}_m)}{t} ; W(\vec{F}_m) = 0$$

$$\Delta E_c = W(\vec{F}_m) = 0 \text{ donc } V = \text{cste.}$$

La vitesse de la particule reste constante, le mouvement est donc uniforme.

Autre méthode :

$$a_T = \frac{dV}{dt} = 0 \text{ ce qui implique que } V = \text{constante.}$$

Donc le mouvement de la particule est uniforme.

2.3- Montrons que la Trajectoire de circulaire.

$$\text{Dans la base de Frenet } (M, \vec{\tau}, \vec{n}), \vec{a} = \frac{dV}{dt}\vec{\tau} + \frac{V^2}{R}\vec{n} \text{ or } V = \text{cste} ; \frac{dV}{dt} = 0. \text{ D'où : } \vec{a} = \frac{V^2}{R}\vec{n}$$

$$\frac{V^2}{R} = \frac{|q|}{m} V.B. |\sin \alpha| \text{ et puisque } (\widehat{\vec{V}, \vec{B}}) = \frac{\pi}{2} ; R = \frac{mV}{|q|B}, \text{ rayon de courbure de la trajectoire.}$$

 $R = \text{constante}$: le mouvement est donc circulaire.

3-

3.1- Expression de la quantité de mouvement

$$p = mV \text{ or } R = \frac{mV}{|q|B} ; p = |q|RB$$

3.2- Expression de la vitesse angulaire de la particule

$$V = R\omega \Leftrightarrow \omega = \frac{V}{R} ; \omega = \frac{|q|B}{m}$$

3.3- Expression de la période du mouvement

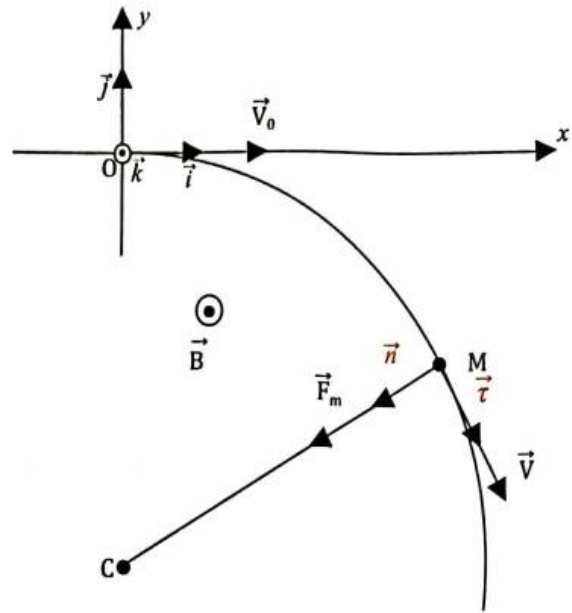
$$T = \frac{2\pi}{\omega} \Rightarrow T = \frac{2\pi m}{|q|B}$$

3.4- Expression de la fréquence du mouvement

$$f = \frac{1}{T} \Rightarrow f = \frac{|q|B}{2\pi m}$$

Commentaire :

Se référer à l'activité 3.



Résolution de l'exercice 2

1-

Système : la particule de charge q .

Référentiel d'étude : référentiel terrestre supposé galiléen.

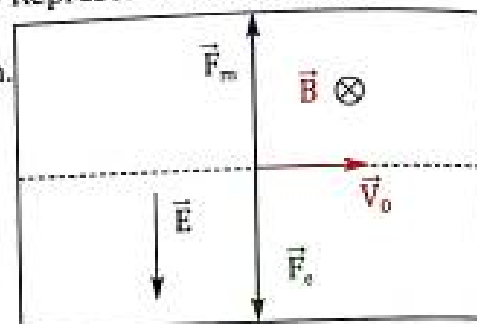
Bilan des forces :

 $\vec{F}_m$: Force de Lorentz ; $\vec{F}_e$: Force électrostatique.3- Relation entre V_0 , B et E La particule n'est pas déviée si $F_m = F_e$ or

$$F_m = |q|V_0B \text{ car } \vec{V}_0 \perp \vec{B} \text{ et } F_e = |q|E$$

$$\Rightarrow |q|V_0B = |q|E ; V_0 = \frac{E}{B}$$

2- Représentation des forces



Commentaire :

Pour les représentations

Pour $\vec{F}_e$, savoir que $\vec{F}_e = q\vec{E}$ et que $q > 0$, $\vec{F}_e$ et $\vec{E}$ ont même sens.Pour $\vec{F}_m$, savoir que $\vec{F}_m = q\vec{V}_0 \wedge \vec{B}$ et en utilisant la règle des trois doigts de la main droite (le pouce pour $q\vec{V}_0$; l'index pour $\vec{B}$ et le majeur pour $\vec{F}_m$) on obtient le sens de $\vec{F}_m$ indiqué.

Résolution de l'exercice 3

1- Expression le rayon R_1

$$R_1 = \frac{mv}{|q|B} \text{ or } v = V_0 \text{ et } q = e \Rightarrow R_1 = \frac{mV_0}{eB}$$

2-

2.1- Durée Δt_1 du trajet :Soit d , la distance parcourue qui est le périmètre du demi-cercle décrit au cours du 1^{er} tour

$$\Delta t_1 = \frac{d}{v_0} \text{ avec } d = \pi R_1 \text{ or } \frac{R_1}{v_0} = \frac{m}{eB} \Rightarrow \Delta t_1 = \frac{\pi m}{eB}$$

La durée Δt_1 du trajet ne varie pas avec la vitesse V_0 , donc elle est indépendante de la vitesse.2.2- Vitesse V_1 Dans chaque "dee" le mouvement du proton est plan, circulaire et uniforme d'où $V_1 = V_0$ Remarque : $\vec{V}_1 = -\vec{V}_0$

3-

3.1- Expression de la vitesse V_2 du proton en D_2 au premier tour :

Système : proton

Référentiel d'étude : référentiel terrestre supposé galiléen

Bilan des forces est :

- force électrostatique $\vec{F}_e$

Appliquons le théorème de l'énergie cinétique

$$\frac{1}{2}mV_2^2 - \frac{1}{2}mV_0^2 = eU \text{ or Dans chaque "dee" le mouvement du proton est plan, circulaire et uniforme. La vitesse dans le dee est constante d'où}$$

$$V_2 = V_0 ; V_2^2 = \frac{2eU}{m} + V_0^2 ; V_2 = \sqrt{\frac{2eU}{m} + V_0^2}$$

3.2- Expression du rayon R_2

$$R_2 = \frac{m \cdot v_2}{e \cdot B}$$

3.3- Durée Δt_2 du trajet

$$\Delta t_2 = \frac{d_2}{v_2} \text{ avec } d_2 = \pi R_2 \text{ or } \frac{R_2}{v_2} = \frac{m}{e \cdot B} ; \Delta t_2 = \frac{\pi m}{eB}$$

4-

4.1- Période

$$T = \Delta t_1 + \Delta t_2 \Rightarrow T = \frac{\pi m}{eB} + \frac{\pi m}{eB} \Rightarrow T = \frac{2\pi m}{eB}$$

Fréquence

$$f = \frac{1}{T} \Rightarrow f = \frac{eB}{2\pi m}$$

4.2- Vitesse maximale atteinte par le proton à la sortie du cyclotron

$$R_D = \frac{m \cdot V_{\max}}{eB} \text{ d'où } V_{\max} = \frac{R_D eB}{m}$$

Energie maximale atteinte par le proton à la sortie du cyclotron

$$E_{C\max} = \frac{1}{2} m \cdot V_{\max}^2 \text{ d'où } E_{C\max} = \frac{1}{2m} (R_D eB)^2$$

Commentaire :

- Connaître l'expression du rayon de la trajectoire.
- Savoir appliquer le théorème de l'énergie cinétique.

V- JE M'EXERCE**Exercices de fixation/ Application**

1-

1- Donne l'expression de la force de Lorentz.

2- Donne la nature du mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ animée d'un vecteur-vitesse $\vec{V}$ tel que $\vec{V} \perp \vec{B}$.

Écris, pour chacune des affirmations ci-dessous, le numéro suivi de la lettre V si l'affirmation est vraie ou de la lettre F si elle est fausse.

- La force de Lorentz est une grandeur vectorielle.

- La force de Lorentz est une action mécanique de contact.

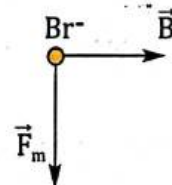
- Une particule chargée, qui pénètre avec un vecteur vitesse $\vec{V}$ dans un champ électrostatique uniforme, subit l'action de la force de Lorentz.- Le vecteur-vitesse d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme est constant si l'angle entre $\vec{V}$ et $\vec{B}$ est non nul.

- La valeur de la vitesse d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme est constante.

- Le cyclotron est un accélérateur de particules.

3- Détermine dans chacun des cas ci-dessous les caractéristiques du vecteur vitesse $\vec{v}$ de la particule.

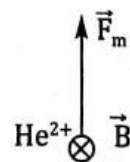
1-



$$F_m = 5,12 \cdot 10^{-15} \text{ N}$$

$$B = 8 \cdot 10^{-2} \text{ T}$$

2-



$$F_m = 1,54 \cdot 10^{-15} \text{ N}$$

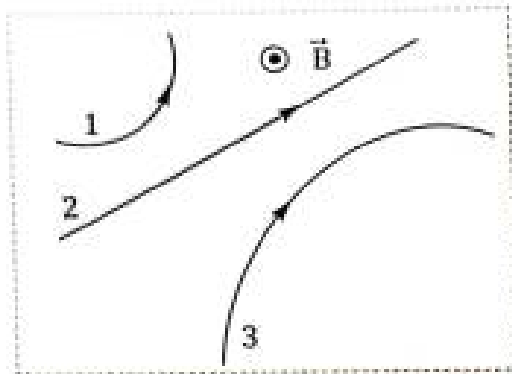
$$B = 4 \cdot 10^{-2} \text{ T}$$

4- Dans le texte ci-dessous, fais correspondre à chaque numéro le mot ou groupe de mots qui convient.

Exemple : (1) : magnétique

Une particule chargée, lancée dans un champ magnétique uniforme subit une force...(1)... appelée force de ...(2)... . Lorsque sa vitesse est colinéaire au champ magnétique, son mouvement est ...(3)... . Lorsque sa vitesse est orthogonale au champ magnétique, son mouvement est plan circulaire et ...(4)...

5. Trois particules chargées traversent une région de l'espace où règne un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ comme l'indique le schéma ci-dessous. Précise le signe de la charge de chaque particule.



6. Sur les schémas ci-dessous figurent soit le vecteur vitesse $\vec{V}$, soit le champ magnétique $\vec{B}$ ou la force de Lorentz $\vec{F}$. Détermine, dans chaque cas, la direction et le sens du vecteur manquant.

$q > 0$					
$q < 0$					

Exercices de renforcement / Approfondissement

7. Une particule de masse m , de charge q positive, animée d'un vecteur vitesse $\vec{v}$ constant dans un champ magnétique $\vec{B}$ uniforme décrit un cercle de rayon R . Les vecteurs $\vec{v}$ et $\vec{B}$ sont orthogonaux.

1- L'expression de la valeur F de la force de Lorentz à laquelle est soumise la particule est :

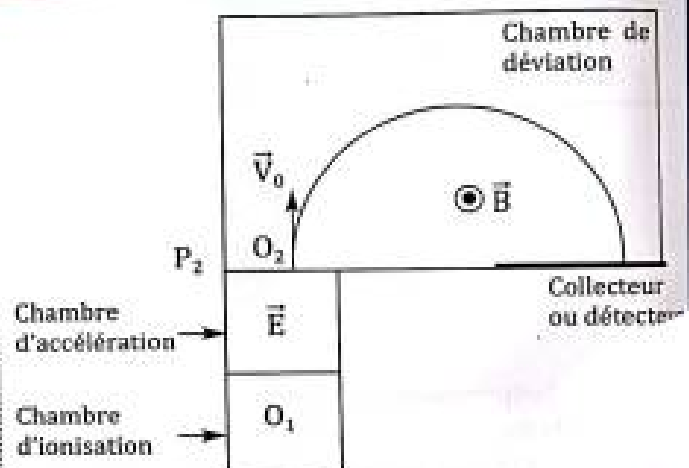
- a) $F = q v B$; b) $F = q l B$;
c) $F = q R B$; d) $F = q m B$.

2- Le rayon R a pour expression :

- a) $R = \frac{qB}{mv}$; b) $R = \frac{mq}{Bv}$;
c) $R = \frac{mv}{qB}$; d) $R = \frac{qv}{mB}$.

Recopie, pour chaque proposition, le numéro suivi de la lettre correspondant à la bonne réponse.

8. Des ions calcium isotopes l'un $^{40}\text{Ca}^{2+}$ et l'autre $^{44}\text{Ca}^{2+}$, de masses respectives m_1 et m_2 sont produits dans une chambre d'ionisation d'un spectrographe de masse en un point O sans vitesse. Ces ions sont accélérés entre les plaques P_1 et P_2 soumises à une tension $U_{P_1 P_2} = U$ dans la chambre d'accélération et arrivent au point O_2 avec la vitesse $\vec{v}_0$ perpendiculairement à la plaque P_2 comme indiqué sur la figure ci-après. Ils sont ensuite déviés dans la chambre de déviation où règne un champ magnétique uniforme sortant et recueillis enfin dans un collecteur. Le poids des ions est négligé.



1- La charge électrique de l'ion $^{40}\text{Ca}^{2+}$ est :

- a) $q = Xe$; b) $q = 2e$; c) $q = -2e$.

2- L'expression de la vitesse des ions $^{40}\text{Ca}^{2+}$ au point O_2 est :

- a) $v_0 = \sqrt{\frac{40eU}{m_1}}$; b) $v_0 = \sqrt{\frac{4eU}{m_1}}$; c) $v_0 = \sqrt{\frac{2eU}{m_1}}$.

3- Dans la chambre de déviation, le mouvement des ions est :

- a) rectiligne et uniforme ; b. circulaire et uniforme ; c. circulaire et accéléré.

4- Dans la chambre de déviation, le rayon de courbure des ions $^{40}\text{Ca}^{2+}$ a pour expression :

- a) $R_1 = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{m_1 U}{e}}$; b) $R_1 = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{e}{m_1 U}}$;

- c) $R_1 = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2e}{m_1 U}}$

5- L'expression du rayon de courbure des ions Ca^{2+} est :

a) $R_2 = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2e}{xU}}$; b) $R_2 = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{xU}{e}}$; c) $R_2 = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{xU}{2e}}$

Écris, pour chacune des propositions ci-dessus, le numéro suivi de la lettre correspondant à la bonne réponse.

9 Un proton, de masse m et de charge $q = e$, pénètre dans un cyclotron avec un vecteur vitesse $\vec{v}_0$ et décrit un premier demi-cercle de rayon R_1 dans le 1^{er} « dee » pendant une durée t_1 , puis, sous une tension alternative entre les plaques P_1 et P_2 . Il pénètre ensuite dans le second « dee » avec une vitesse $\vec{v}_2$ et décrit un deuxième demi-cercle de rayon R_2 pendant une durée t_2 . Dans chacun « dee » règne un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ perpendiculaire au vecteur-vitesse.

1- L'expression du rayon R_1 du premier demi-cercle est :

a) $R_1 = \frac{ev_0}{mB}$; b) $R_1 = \frac{eB}{mv_0}$; c) $R_1 = \frac{mv_0}{eB}$; d) $R_1 = \frac{Bv_0}{me}$

2- L'expression de la durée t_1 du trajet est :

a) $t_1 = \frac{eB}{\pi m}$; b) $t_1 = \frac{mv_0}{eB}$; c) $t_1 = \frac{v_0}{\pi mB}$; d) $t_1 = \frac{\pi m}{eB}$

3- L'expression de la durée t_2 du trajet est :

a) $t_2 = \frac{2eB}{\pi m}$; b) $t_2 = \frac{\pi m}{eB}$; c) $t_2 = \frac{2v_0}{\pi mB}$; d) $t_2 = \frac{2\pi m}{eB}$

4- L'expression de la période T du mouvement est :

a) $T = \frac{2eB}{\pi m}$; b) $T = \frac{\pi m}{eB}$; c) $T = \frac{2v_0}{\pi mB}$; d) $T = \frac{2\pi m}{eB}$

5- L'expression de la fréquence N du mouvement est :

a) $N = \frac{2\pi mv_0}{eB}$; b) $N = \frac{eB}{2\pi m}$; c) $N = \frac{2eB}{2\pi}$; d) $N = \frac{mv_0}{eB}$

Écris, pour chacune des propositions ci-dessus, le numéro suivi de la lettre correspondant à la bonne réponse.

10 Un électron de masse m animé d'un vecteur vitesse $\vec{v}$ de valeur v pénètre dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ de valeur $B = 1$ T. Données : charge élémentaire $e = 1.6 \cdot 10^{-16}$ C ; $m = 9.1 \cdot 10^{-31}$ kg ; $v = 3 \cdot 10^7$ m/s. Calcule l'intensité F de la force de Lorentz $\vec{F}$ dans chacun des cas suivants :

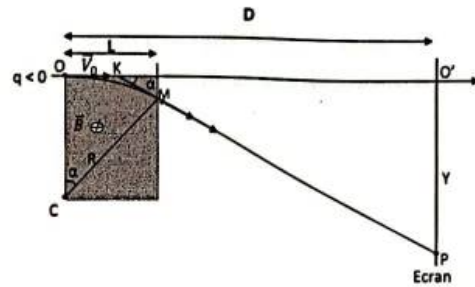
1^{er} cas : $\vec{v}$ et $\vec{B}$ ont la même direction et le même sens ;

2^{ème} cas : $\vec{v}$ et $\vec{B}$ ont la même direction mais des sens contraires ;

3^{ème} cas : $\vec{v}$ et $\vec{B}$ sont orthogonaux ;

4^{ème} cas : $\vec{v}$ et $\vec{B}$ font un angle de 45° entre eux.

11 Un électron pénètre en O, avec un vecteur vitesse $\vec{V}_0$ dans un domaine de largeur L où règne le champ magnétique $\vec{B}$ uniforme entrant, il décrit un arc de cercle ($\widehat{OM}$). Au-delà du point M, l'électron n'est soumis à aucune force, il décrit un mouvement rectiligne et uniforme et vient heurter un écran placé à une distance D du point O (Voir figure ci-dessous).



1- Montre que le mouvement de l'électron est circulaire et uniforme.

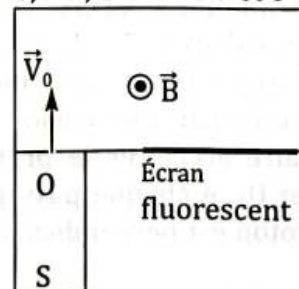
2- Déduis-en l'expression du rayon R de la trajectoire de l'électron en fonction de m , e , v et B .

3- Donne l'expression de l'arc $\widehat{OM}$ en fonction de R et la déviation angulaire α .

4- Montre que la déflexion magnétique $Y = O'P$ est de la forme $Y = kB$, où le coefficient est fonction de e , D , L , m et v , en considérant que la déviation angulaire α est faible et $\widehat{OM} \approx L$.

12 Ton ami de classe te propose de l'aider à étudier la séparation des noyaux d'hélium $^3He^{2+}$ de masse m_1 et $^4He^{2+}$ de masse m_2 . Ces ions pénètrent en S avec une vitesse considérée nulle. Ils y sont accélérés par une tension $U = V_s - V_0$ établie entre les plaques d'entrée et de sortie. En O, ils quittent l'accélérateur avec un vecteur vitesse $\vec{v}_0$ perpendiculaire à la plaque de sortie et entrent dans l'espace champ magnétique $\vec{B}$ sortant, uniforme et perpendiculaire au plan de la figure. Ils sont enfin reçus sur un écran fluorescent (Voir figure).

Données : $B = 0,5$ T ; $U = 150$ V et $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

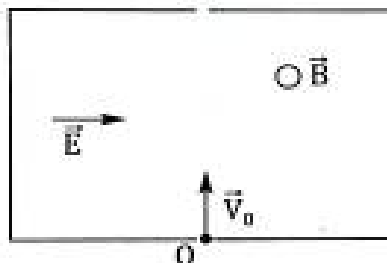


- 1- Établis en fonction de U , e , m_1 et m_2 :
 - 1.1- la vitesse d'un ion de masse m_1 ;
 - 1.2- la vitesse d'un ion de masse m_2 .
- 2- Dans l'espace du champ magnétique $\vec{B}$, les trajectoires des noyaux sont des demi-cercles.
 - 2.1- Donne l'expression littérale de leurs rayons respectifs R_1 et R_2 en fonction de m_1 ou m_2 , e et B .

- 2.2- Calcule R_1 et R_2 .
- 3- I_1 désigne le point d'impact des noyaux ${}^3\text{He}$ sur l'écran et I_2 celui de ${}^4\text{He}^{2+}$.
Calcule la distance $d = I_1 I_2$.

Situations d'évaluation

13. Votre professeur de Physique-Chimie, lors d'une séance de travaux dirigés, vous demande d'étudier un filtre de vitesse. Dans ce filtre où règnent un champ magnétique $\vec{B}$ et un champ électrostatique $\vec{E}$ uniformes, un proton est lancé avec un vecteur-vitesse $\vec{V}_0$ en un point O (Voir figure ci-dessous).

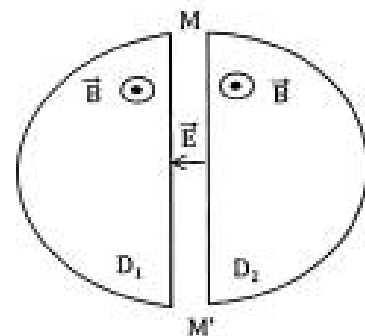


- 1- Donne le rôle d'un filtre de vitesse.
- 2- Détermine le sens de $\vec{B}$ pour que la trajectoire du proton soit rectiligne. (Voir figure ci-dessous).
- 3- Trouve dans ce cas, une relation entre E , B et V_0 .
- 4- Représente, en justifiant ta réponse, la trajectoire du proton si sa vitesse V est :
 - 4.1- $V < V_0$;
 - 4.2- $V > V_0$.

14. Ton groupe de travail te sollicite pour étudier le mouvement d'un proton dans un cyclotron. Le proton pénètre dans le cyclotron, constitué par deux demi-cylindres conducteurs creux D_1 et D_2 appelés « dees » séparés par un intervalle étroit. Un champ magnétique $\vec{B}$ est créé dans D_1 et D_2 , parallèlement à l'axe des demi-cylindres. Un champ électrostatique $\vec{E}$ est créé dans l'intervalle étroit entre les « dees » D_1 et D_2 perpendiculairement à leur surface. Le champ $\vec{E}$, nul à l'intérieur des dees, est créé par une tension U alternative de sorte à faire accélérer le proton entre les « dees » D_1 et D_2 . A chaque passage, le vecteur vitesse du proton est perpendiculaire à $\vec{B}$ et aux

différents diamètres MM' de chacun des « dees », (voir figure ci-dessous).

Le proton effectue n tours pour acquérir une vitesse de $v = 2.10^7$ m/s

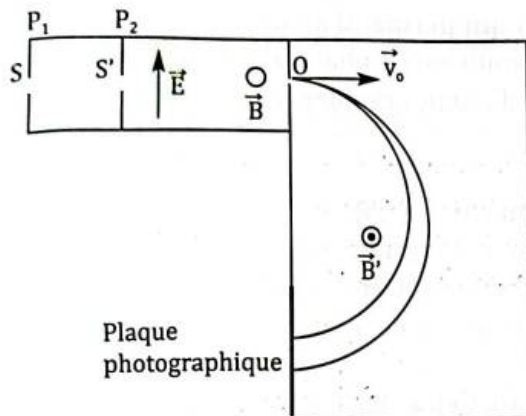


Données : valeur du champ magnétique $B = 1$ T ; Tension électrique : $U = 4\,000$ V ; Charge élémentaire $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C ; Masse du proton ; $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg.

- 1- Montre que dans un « dee », le mouvement d'un proton est uniforme et circulaire.
- 2- Détermine :
 - 2.1- la durée Δt d'un demi-tour ;
 - 2.2- la période T .
- 3- Détermine l'énergie cinétique E_c transmise au proton à chaque tour.
- 4- Détermine le nombre de tours n que doit effectuer les protons.

15. Les ions de deux isotopes du mercure ${}^{200}\text{Hg}^{2+}$ et ${}^{202}\text{Hg}^{2+}$ de masses respectives $m_1 = 200.u$ et $m_2 = 202.u$ sont émis d'un point S avec une vitesse nulle et sont ensuite accélérés entre les plaques P_1 et P_2 verticales soumises à une tension $U_{P_1 P_2} = U$. Les ions traversent le point S d'une fente placée sur la plaque P_2 et pénètrent dans un filtre de vitesse où règnent un champ électrique $\vec{E}$ et un champ magnétique $\vec{B}$ uniformes orthogonaux et arrivent au point O avec le vecteur vitesse $\vec{V}_0$ perpendiculairement à la plaque P_2 comme indiqué sur la figure ci-après.

Au point O, ils sont ensuite déviés dans une chambre où règne un champ magnétique $\vec{B}$ uniforme sortant et recueillis enfin sur une plaque photographique. Les poids des ions sont négligés et leurs masses seront assimilées à celles de leurs noyaux.



Données :

unité de masse atomique $u = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$;

charge élémentaire $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$;

$E = 6 \cdot 10^4 \text{ V/m}$; $B = 100 \text{ mT}$ et $B' = 200 \text{ mT}$.

1- Représente sur un schéma :

1.1- le vecteur champ électrostatique $\vec{E}$ régnant entre les plaques P_1 et P_2 ;

1.2- la tension $U_0 = U_{P_1 P_2}$;

1.3- le champ magnétique $\vec{B}$ pour obtenir une trajectoire rectiligne des ions entre S' et O.

2- Établis en S' l'expression :

2.1- de la vitesse de l'ion $^{200}\text{Hg}^{2+}$ en fonction de u, U et e ;

2.2- la vitesse de l'ion $^{202}\text{Hg}^{2+}$ en fonction de u, U et e .

3- Montre que seuls les ions qui ont une certaine vitesse ne sont pas déviés entre S' et O et parviennent en O.

4- Détermine la distance d entre les deux points d'impact des deux isotopes sur la plaque photographique.

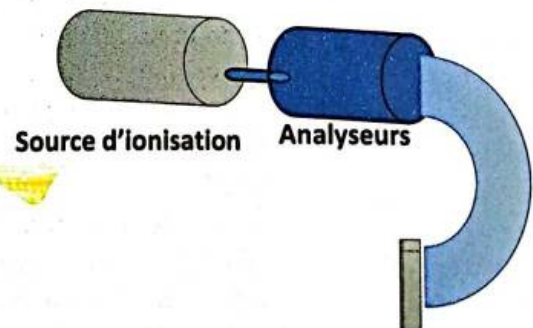
VI- RENDEZ-VOUS DES CURIEUX

LES TYPES DE SOURCE D'IONISATION DANS LES SPECTROMÈTRES DE MASSE

Le spectromètre de masse a été conçu par le britannique Joseph John Thomson et comporte une source d'ionisation et un ou plusieurs analyseurs.

Cette source d'ionisation consiste à vaporiser les molécules et à les ioniser. Il existe plusieurs types de sources d'ionisation, chacune étant utilisée en fonction du résultat recherché et des molécules analysées. Ce sont :

Les sources d'ionisation électronique (EI). Lors de la rencontre des électrons, émis par un filament, et des molécules entrant dans la source, si l'énergie cinétique des électrons est suffisante, un électron est alors arraché de la molécule, la transformant ainsi en un ion radical, qui peut ensuite se fragmenter en de nombreux fragments, très riches en informations structurales.



Les sources d'ionisation chimiques (CI), un gaz réactif est introduit dans la source et qui s'ionise par impact ou choc électronique. Il s'ensuit alors une série de réactions chimiques qui donnent naissance avec les molécules arrivant à la source. Ces types de réactions ions-molécules produisent principalement des ions positifs qui permettent de déterminer la masse moléculaire du composé étudié. Dans le cas des ions négatifs, le principe est de charger négativement ces molécules en les bombardant d'électrons qui seront capturés par les atomes électroattracteurs.

L'ionisation par bombardement d'atomes rapides (FAB) qui permet d'analyser des molécules non vaporisables *sus vide*. Cette ionisation est effectuée par expulsion en phase vapeur des ions contenus dans un échantillon liquide à la suite d'un bombardement d'atomes rapides notamment d'argon ou de xénon.

L'ionisation par électronébulisation ou electrospray ionisation (ESI) dont le principe consiste à soumettre à un champ électrique à pression atmosphérique des microgouttelettes de solutés et qui subissent de multiples collisions avec les molécules de gaz et de solvant. Cette méthode permet entre autres de générer une ionisation «douce» des ions moléculaires majoritairement formés.

La désorption-ionisation laser assistée par matrice (MALDI). Cette méthode reposant sur l'utilisation d'un mélange matrice / échantillon, conduit beaucoup plus à la formation d'ions monochargés que multichargés.

L'ionisation thermique (TIMS) qui utilise des lentilles électromagnétiques qui focalisent des ions issus du chauffage de l'échantillon.

LEÇON

7

LOI DE LAPLACE

TABLEAU DES HABILETÉS ET DES CONTENUS

HABILETÉS	CONTENUS
Énoncer	la loi de Laplace.
Connaitre	- l'expression de la force de Laplace $\vec{F} = i\vec{\ell} \wedge \vec{B}$. - les règles d'orientation de la force électromagnétique.
Déterminer	les caractéristiques de la force de Laplace.
Représenter	la force de Laplace $\vec{F} = i\vec{\ell} \wedge \vec{B}$.
Utiliser	la loi de Laplace.
Analyser	quelques applications de la loi de Laplace : - balance de Cotton ; - roue de Barlow.
Expliquer	le fonctionnement d'un haut-parleur.

NOTIONS ESSENTIELLES

- Loi de Laplace
- force de Laplace
- force électromagnétique
- Balance de Cotton
- Roue de Barlow

SITUATION D'APPRENTISSAGE

Un élève d'une classe de Terminale Scientifique d'un lycée, en suivant un documentaire, apprend que lorsqu'une tige métallique parcourue par un courant électrique continu est plongée dans un champ magnétique, il s'exerce sur elle une force électromagnétique appelée force de Laplace. Il apprend aussi que cette force a de nombreuses applications notamment dans les hauts parleurs, les moteurs etc.... L'élève partage cette information avec ses camarades de classe. Voulant en savoir plus, ces élèves, sous la supervision de leur professeur, entreprennent de s'informer sur la force de Laplace, de déterminer ses caractéristiques et d'analyser quelques une de ses applications.

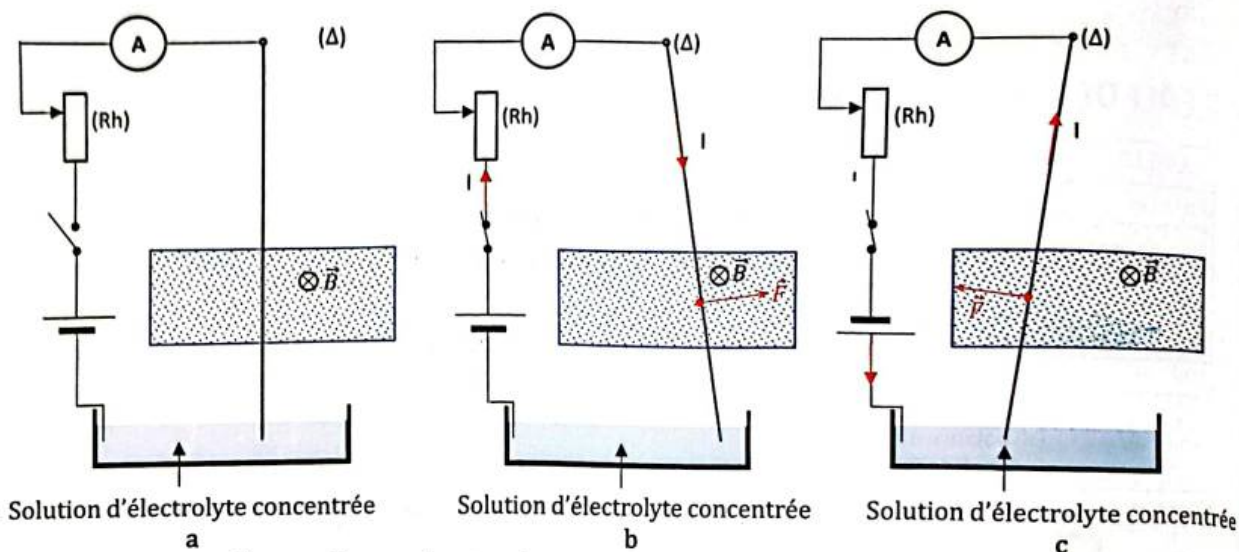


I- ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1 : METTRE EN ÉVIDENCE LA FORCE DE LAPLACE

Expérience 1 :

Réalise le circuit du document 1 a ; la tige est dans l'entrefer d'un aimant en U.



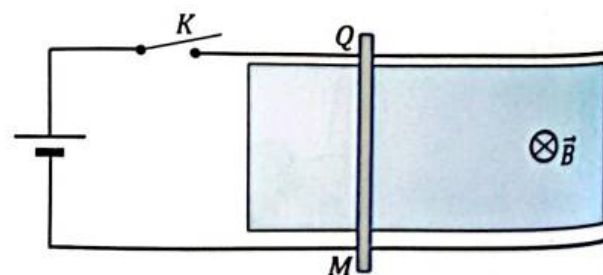
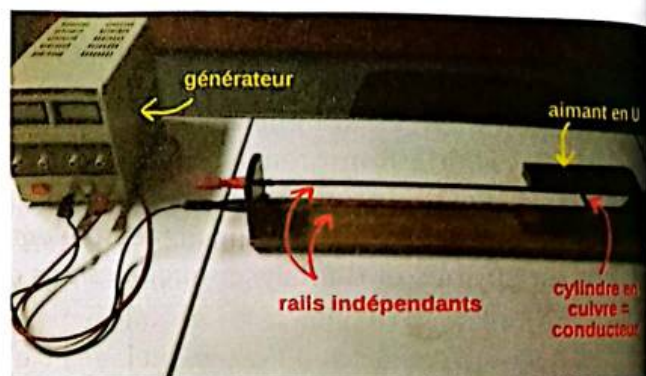
Document 1 : Déviation d'un conducteur dans un champ magnétique uniforme (expérience de la tige de Laplace)

- 1- Note la position de la tige lorsque le circuit est ouvert.
- 2- Observe le déplacement de la tige métallique rigide lorsque tu fermes le circuit.
- 3- Change le sens du courant et note le sens de déplacement de la tige.
- 4- Augmente l'intensité du courant à l'aide du rhéostat et note tes observations.
- 5- Change le sens du champ magnétique et note le sens de déplacement de la tige métallique.
- 6- Conclue.

Expérience 2 :

Tu utilises le dispositif schématisé sur le document 2, constitué d'une tige métallique cylindrique MQ pouvant glisser sur des rails reliés à un circuit électrique. La tige métallique MQ est placée dans l'entrefer d'un aimant en U où il règne un champ magnétique uniforme.

- 1- La tige est-elle en mouvement lorsque l'interrupteur est ouvert ?
- 2- Ferme l'interrupteur.
 - 2.1- Qu'observes-tu au niveau de la tige MQ ?
 - 2.2- Que se passe-t-il lorsque tu inverses les bornes du générateur ?
 - 2.3- Que se passe-t-il lorsque tu inverses les pôles de l'aimant en U ?
 - 2.4- Que se passe-t-il si tu disposes l'aimant de sorte que le vecteur champ magnétique soit parallèle à la tige ?
- 3- Conclue.



Document 2 : Déplacement d'un conducteur sur des rails de Laplace dans un champ magnétique uniforme

1- Observations

1.1- Expérience 1

- En absence de courant électrique dans la tige, celle-ci reste dans sa position verticale d'équilibre.
- Lorsque la tige est parcourue par un courant électrique, elle subit une déviation.
- Lorsque le sens du courant électrique dans la tige change, ou lorsque le sens du champ magnétique uniforme change, la déviation de la tige change de sens.
- Plus l'intensité du courant électrique est grande, plus la déviation de la tige est grande.

1.2- Expérience 2

- En absence de courant électrique dans la tige, celle-ci reste immobile et en équilibre sur les rails.
- Lorsque la tige est parcourue par un courant électrique, elle se déplace.
- Le déplacement de la tige change de sens lorsque le sens du courant électrique ou le sens du champ magnétique change.
- Lorsque le vecteur champ magnétique est parallèle à la tige, aucun déplacement de celle-ci n'est observé.

2- Interprétation

- En absence de courant électrique dans la tige, celle-ci n'est soumise qu'à son poids et à la réaction de l'axe de rotation ou à la réaction des rails ; elle reste donc en équilibre.
 - Lorsque la tige est traversée par un courant électrique, elle subit en plus de son poids et de la réaction du support, une force électromagnétique $\vec{F}$. Elle se met donc en mouvement.
- Cette force électromagnétique $\vec{F}$ dépend du champ magnétique uniforme $\vec{B}$, de l'intensité I du courant électrique et de la longueur ℓ de la partie de la tige se trouvant dans le champ magnétique.

3- Conclusion

Énoncé de la loi de Laplace

Une portion rectiligne de conducteur de longueur ℓ , parcourue par un courant d'intensité I et placée dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$, est soumise à des forces électromagnétiques réparties, équivalentes à une force unique $\vec{F}$ appelée force de Laplace, appliquée en son milieu et donnée par la relation :

$$\vec{F} = I \vec{\ell} \wedge \vec{B}$$

Les caractéristiques de la force de Laplace sont :

- point d'application : le milieu de la portion ℓ du conducteur placé dans le champ magnétique ;
- direction : la droite normale au plan formé par la base $(\vec{\ell}, \vec{B})$; $\vec{\ell}$ a le sens du courant électrique I ;
- sens : le sens de la force est tel que le trièdre $(\vec{\ell}, \vec{B}, \vec{F})$ est direct ; il est donné par la règle des trois doigts de la main droite ou la règle du bonhomme d'Ampère ;
- valeur ou intensité : $F = I \cdot \ell \cdot B |\sin \alpha|$ avec $\alpha = (\vec{\ell}, \vec{B})$.

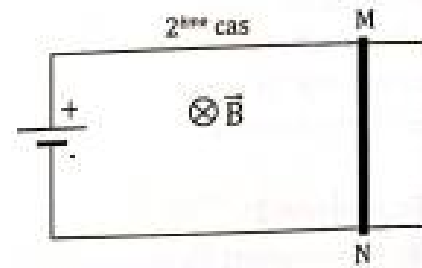
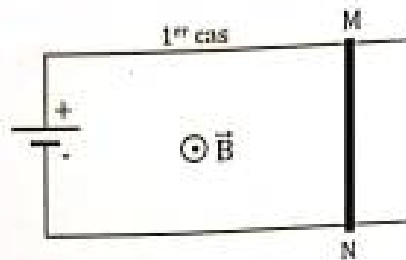
$$\text{Si } I \vec{\ell} // \vec{B} ; |\sin(\widehat{I \vec{\ell}, \vec{B}})| = 0 \Rightarrow F = 0$$

$$\text{Si } I \vec{\ell} \perp \vec{B} ; |\sin(\widehat{I \vec{\ell}, \vec{B}})| = 1 \Rightarrow F = I \cdot \ell \cdot B$$

J'évalue mes acquis



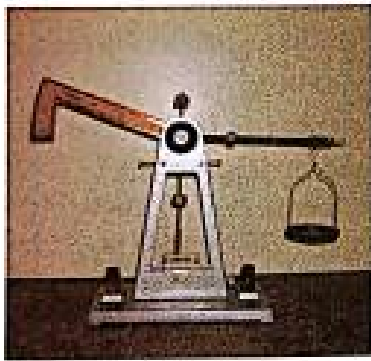
Une barre en cuivre MN glisse sans frottements sur des rails de Laplace formant un circuit alimenté par un générateur de courant continu. L'ensemble est plongé dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ comme indiqué sur la figure ci-dessous.



Détermine le sens de déplacement de la tige en cuivre MN dans chacun des cas.

ACTIVITÉ 2 : DÉTERMINER L'INTENSITÉ D'UN CHAMP MAGNÉTIQUE À L'AIDE D'UNE BALANCE DE COTTON

Tu disposes d'une balance de Cotton (document 3a), des masses marquées et des fils conducteurs. Tu alimentes en courant la balance et tu places des masses marquées sur le plateau (document 3 b).



a



b

Document 3 : Détermination de la valeur d'un champ magnétique à l'aide de la balance de Cotton

- 1- Relève, pour chaque valeur m des masses marquées sur le plateau, la valeur de l'intensité I du courant permettant d'obtenir l'équilibre.
- 2- Complète le tableau ci-dessous.

m (g)	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
I (A)						

- 3- Trace la courbe donnant m en fonction de I à l'échelle $1 \text{ cm} \leftrightarrow 1 \text{ A}$ et $1 \text{ cm} \leftrightarrow 0,1 \text{ g}$.
- 4- Détermine le coefficient de la droite obtenue.
- 5- Écris les conditions d'équilibre de la balance.
- 6- Dédus la valeur du champ magnétique $\vec{B}$.

Je fais le point de l'activité

1- Tableau de mesures et courbe $m = f(I)$

m (g)	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
I (A)	0	0,9	2	3,1	4	4,9

La courbe obtenue est une droite passant par l'origine O des axes.

2- Coefficient directeur de la droite

L'équation de la courbe obtenue est de la forme

$$m = kI$$

$$k = \frac{\Delta m}{\Delta I} ; \text{AN : } k = \frac{(0,8 - 0) \cdot 10^{-3}}{4 - 0} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{A}^{-1}$$

3- Conditions d'équilibre de la balance et valeur du champ magnétique

La balance de Cotton, dans le référentiel du laboratoire supposé galiléen, est soumise à son poids $\vec{P}_0$, à la réaction $\vec{R}_N$ de l'axe, au poids $\vec{P}$ des masses marquées, à la force $\vec{F}$ de Laplace exercée sur la portion AC, à la force $\vec{F}_1$ de Laplace exercée sur la portion PM, à la force $\vec{F}_2$ de Laplace exercée sur la portion NQ.

À l'équilibre :

$$-\vec{P}_0 + \vec{R}_N + \vec{P} + \vec{F} + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{0} ;$$

$$-\sum M_{\Delta}(\vec{F}_{\text{ext}}) = 0 \Rightarrow$$

$$M_{\Delta}(\vec{P}_0) + M_{\Delta}(\vec{R}_N) + M_{\Delta}(\vec{F}) + M_{\Delta}(\vec{F}_1) + M_{\Delta}(\vec{F}_2) + M_{\Delta}(\vec{P}) = 0$$

Or

$$M_{\Delta}(\vec{P}_0) = M_{\Delta}(\vec{R}_N) = M_{\Delta}(\vec{F}_1) = M_{\Delta}(\vec{F}_2) = 0$$

car les droites d'action de ces forces passent par l'axe de rotation (Δ).

$$\Rightarrow M_{\Delta}(\vec{F}) + M_{\Delta}(\vec{P}_0) = 0. \text{ Or } F = I \ell B$$

$$\Rightarrow M_{\Delta}(\vec{F}) = I \ell B d_1 \text{ et } M_{\Delta}(\vec{P}_0) = -mgd_2$$

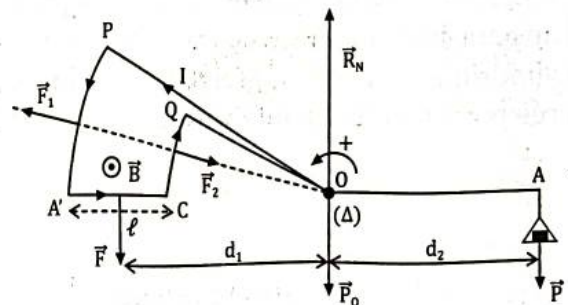
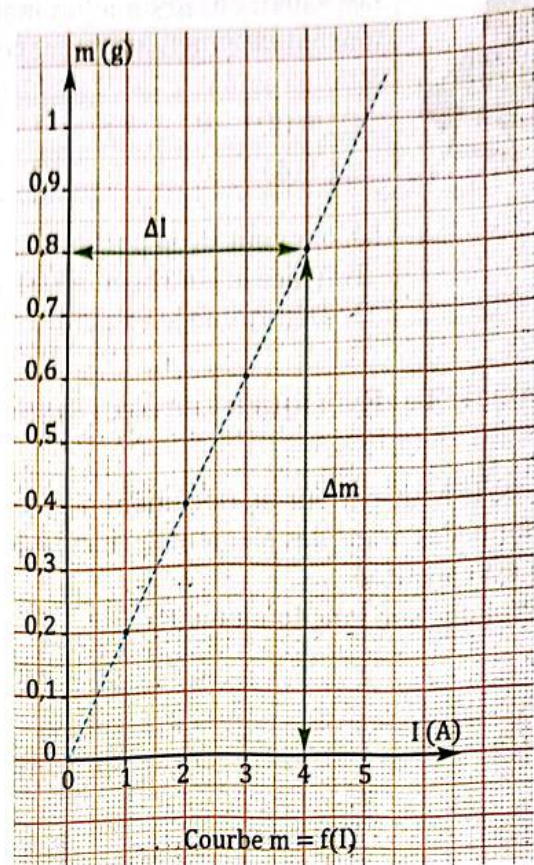
$$I \ell B d_1 - mgd_2 = 0. \text{ Or } d_1 = d_2 \Rightarrow I \ell B = mg \text{ d'où : } m = \frac{\ell B}{g} I.$$

$$\text{On a bien } m = kI \text{ avec } k = \frac{\ell B}{g} ; B = \frac{g}{\ell} k.$$

$$\ell = A'C = 2 \text{ cm et } g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$B = \frac{9,8}{2 \cdot 10^{-2}} \times 2 \cdot 10^{-4} \quad B = 9,8 \cdot 10^{-2} \text{ T}$$

La balance de Cotton permet de mesurer les intensités des champs magnétiques uniformes et intenses.



J'évalue mes acquis



Les valeurs m des masses marquées et l'intensité I du courant électrique traversant une balance de Cotton sont consignées dans le tableau ci-dessous.

m (g)	0	0,5	1	1,5	2	1,5
I (A)	0	1	2	3	4	2,6

La longueur de la portion utile de la balance de Cotton est $\ell = 2$ cm et $g = 9,8$ m.s⁻².

- 1- Trace la courbe $m = f(I)$. Échelles : 2 cm $\leftrightarrow$ 1 A et 2 cm $\leftrightarrow$ 0,5 g.
- 2- Détermine la valeur du champ magnétique.

ACTIVITÉ 3 : EXPLIQUER LE FONCTIONNEMENT D'UN HAUT-PARLEUR

Observe le haut-parleur du document 4 ci-contre.

- 1- Donne les noms des éléments principaux dont il est constitué.
- 2- Explique son fonctionnement.

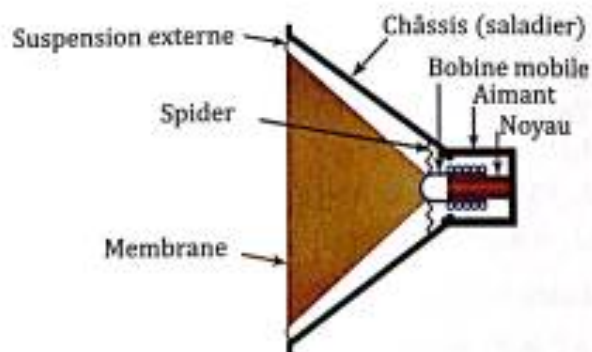


Document 4 : Haut-parleur aérodynamique

Je fais le point de l'activité

1- Les principaux éléments d'un haut-parleur

Un haut-parleur électrodynamique est constitué de trois éléments principaux : un aimant cylindrique, une bobine et une membrane. La bobine, mobile, est placée dans le champ magnétique créé par l'aimant qui lui est fixe.



Document 5 : Constitution d'un haut-parleur aérodynamique

2- Fonctionnement d'un haut-parleur

Lorsqu'un courant électrique circule dans la bobine, chaque portion $\delta \vec{\ell}$ d'une spire est soumise à la force élémentaire de Laplace $\delta \vec{F} = I \delta \vec{\ell} \wedge \vec{B}$. L'ensemble des forces élémentaires de Laplace, perpendiculaires au plan des spires, provoque un coulisement de la bobine suivant son axe, donc le déplacement de la membrane.

Lorsque le courant produit est variable, la force résultante suit fidèlement sa variation, donc elle va aussi varier en amplitude et en sens. Cela entraîne la vibration de la membrane et l'émission de son de même fréquence que le courant variable dans la bobine.



Nomme les parties essentielles d'un haut-parleur électromagnétique.

II- RÉSUMÉ DE COURS

Énoncé de la loi de Laplace

Une portion rectiligne de conducteur de longueur ℓ , parcourue par un courant d'intensité I et placée dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$, est soumise à des forces électromagnétiques réparties, équivalentes à une force unique $\vec{F}$ appelée force de Laplace, appliquée en son milieu et donnée par la relation : $\vec{F} = I\vec{\ell} \wedge \vec{B}$

Caractéristiques de la force de Laplace :

Le vecteur $I\vec{\ell}$ a le même sens que le courant électrique I .

- direction : perpendiculaire au plan formé par $I\vec{\ell}$ et $\vec{B}$;
- sens : le sens de la force est tel que le trièdre $(\vec{\ell}, \vec{B}, \vec{F})$ est direct. Il est aussi donné par la règle des trois doigts de la main droite ou la règle du bonhomme d'Ampère ;
- intensité : $F = I\ell B |\sin \alpha|$ avec $\alpha = (\vec{\ell}, \vec{B})$.

III- MÉTHODES

Comment retrouver le sens d'un des vecteurs du trièdre $(I\vec{\ell}, \vec{B}, \vec{F})$.

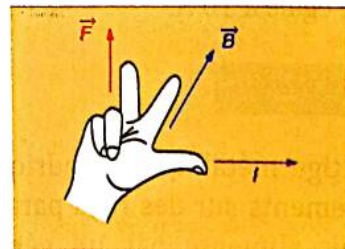
Adoptons la convention de représentation suivante, pour dessiner un vecteur qui n'est pas dans le plan de la feuille.

- ⊗ pour un vecteur qui rentre dans le plan de la feuille ;
- ⊙ pour un vecteur qui sort du plan de la feuille et pointe vers nous.

• Règle des trois doigts

On utilise les trois doigts de la main droite pour trouver le sens de $\vec{F}$.

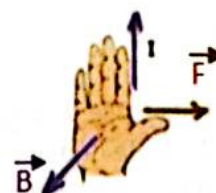
- Le pouce suit le sens du courant I .
- L'index suit le sens du champ magnétique $\vec{B}$.
- Le pouce et l'index forment un plan, auquel le vecteur force $\vec{F}$ est orthogonal.
- Le majeur de la main droite donne le sens du vecteur force $\vec{F}$.



• Règle de la main droite

$$\vec{F} = I\vec{\ell} \wedge \vec{B}$$

- On place la main droite de manière à ce que les doigts soient dirigés dans le sens du courant électrique I .
- La paume de la main est dirigée dans le sens du vecteur champ magnétique $\vec{B}$.
- Le pouce tendu indique le sens de la force magnétique $\vec{F}$.



- Règle du bonhomme d'Ampère
 - Le courant I entre par les pieds et sort par la tête.
 - Le bonhomme regarde dans la direction de $\vec{B}$.
 - Le bras gauche indique la direction de $\vec{F}$.



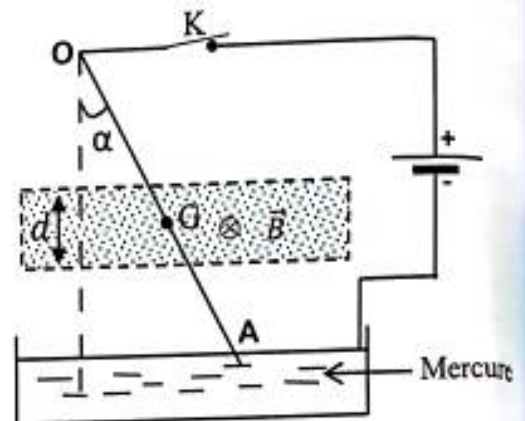
IV- EXERCICES RÉSOLUS

Exercice 1

Afin de mettre en évidence la force de Laplace, votre professeur fait réaliser le dispositif ci-contre constitué d'une tige métallique rectiligne et homogène OA de masse m et de longueur OA.

La tige est suspendue par son extrémité O à un point fixe. Le circuit fermé est alimenté par un générateur qui fait circuler un courant d'intensité I . Le professeur introduit le dispositif dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ perpendiculaire au plan de la feuille et agissant sur une largeur d dont le centre d'inertie G de la tige est le milieu. Il ferme l'interrupteur K et la tige métallique s'écarte de la verticale d'un angle α (voir schéma).

Établis l'expression de l'angle α en fonction de I , B , d , m et g .



Exercice 2

Tu considères la balance de Cotton (Activité 2) pour laquelle $d = d' = 15 \text{ cm}$ et $MN = 4 \text{ cm}$. Lorsque le courant électrique a pour intensité $I = 10 \text{ A}$, il faut, pour rétablir l'équilibre, mettre sur le plateau une masse marquée $m = 30 \text{ g}$.

1- Détermine :

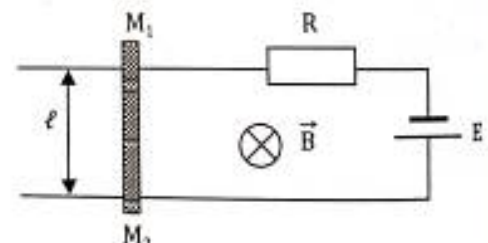
- 1.1- la valeur de la force $\vec{F}$ qui s'exerce sur MN ;
- 1.2- la valeur du champ magnétique.

2- La balance est sensible au décigramme.

Détermine la plus petite valeur du champ magnétique que l'on peut mesurer si l'intensité du courant reste égale à 10 A .

Exercice 3

Une tige métallique cylindrique M_1M_2 glisse sans frottements sur des rails parallèles. Elle forme un circuit alimenté par un générateur de courant continu de f.é.m. E , de résistance interne négligeable et d'un conducteur ohmique de résistance R . L'ensemble est plongé dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ comme indiqué sur la figure ci-contre.



- 1- Représente la force de Laplace appliquée à la tige M_1M_2 .
- 2- Dédus le sens de déplacement de la tige.
- 3- Détermine la valeur de la force de Laplace s'exerçant sur la barre en fonction de E , R , B et l .

Résolution de l'exercice 1

Système : la tige métallique OA.

Référentiel d'étude : référentiel terrestre supposé galiléen.

Bilan des forces :

$\vec{P}$: le poids de la tige métallique OA ;

$\vec{R}_N$: la réaction de l'axe de rotation ;

$\vec{F}_L$: la force de Laplace.

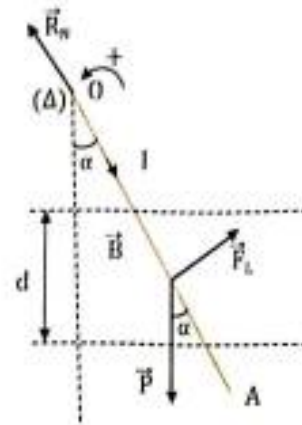
A l'équilibre, la somme des moments des forces appliquées à la tige est nulle :

$$\sum M_A(\vec{F}_{ext}) = 0 :$$

$$M_A(\vec{P}) + M_A(\vec{R}_N) + M_A(\vec{F}_L) = 0$$

$$-P \frac{d}{2} \sin \alpha + 0 + F \frac{d}{2} = 0 \text{ or } F = l \frac{d}{\cos \alpha} B ; mgsin \alpha = l \frac{d}{\cos \alpha} B ; \sin \alpha \cos \alpha = \frac{ldB}{mg} \text{ or } 2\sin \alpha \cos \alpha = \sin 2\alpha$$

$$\sin 2\alpha = 2 \frac{ldB}{mg} \text{ ou } \alpha = \frac{1}{2} \sin^{-1} \left(2 \frac{ldB}{mg} \right).$$



Commentaire :

La force de Laplace s'applique au milieu de la portion de la tige qui baigne dans le champ magnétique.

Savoir appliquer le théorème des moments.

$$F = l \ell' B \quad \cos \alpha = \frac{d}{\ell'} \quad \ell' = \frac{d}{\cos \alpha}$$

Résolution de l'exercice 2

Système : la balance de Cotton.

Référentiel d'étude : référentiel terrestre supposé galiléen.

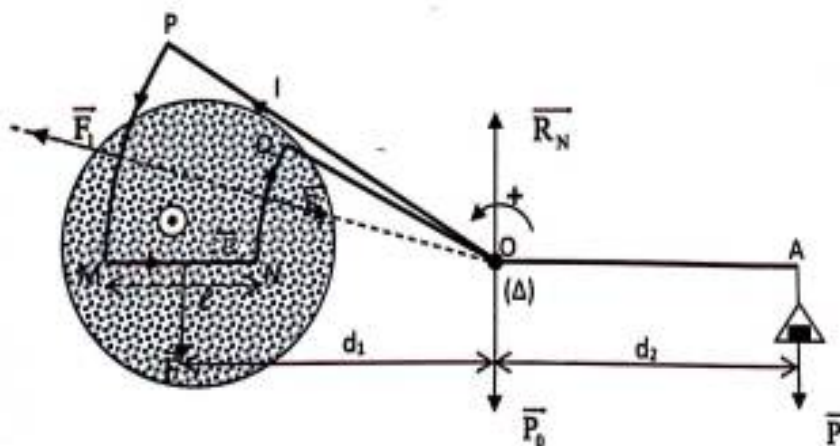
Bilan des forces :

$\vec{P}_0$: le poids de la balance ; $\vec{R}_N$: la réaction de l'axe ; $\vec{P}$: le poids des masses marquées ;

$\vec{F}$: la force de Laplace exercée sur la portion MN ; $\vec{F}_1$: la force de Laplace exercée sur la portion PM

$\vec{F}_2$ la force de Laplace exercée sur la portion NQ.

Représentation des forces



A l'équilibre, la somme des moments des forces appliquées est nulle :

$$\sum M_A(\vec{F}_{ext}) = 0 ; M_A(\vec{P}_0) + M_A(\vec{R}_N) + M_A(\vec{F}) + M_A(\vec{F}_1) + M_A(\vec{F}_2) + M_A(\vec{P}) = 0$$

Or $M_A(\vec{P}_0) = M_A(\vec{R}_N) = M_A(\vec{F}_1) = M_A(\vec{F}_2) = 0$, car les droites d'action de ces forces passent par l'axe de rotation (Δ).

$$\Rightarrow M_A(\vec{F}) + M_A(\vec{P}) = 0 \Rightarrow F.d_1 - mgd_2 = 0 \Rightarrow F = \frac{mgd_2}{d_1}$$

$$F = \frac{30 \cdot 10^{-3} \times 9,81 \times 15}{15} ; F = 0,29 \text{ N.}$$

$$1.2- F = I\ell B ; B = \frac{F}{I\ell}$$

$$B = \frac{0,29}{10 \times 4 \cdot 10^{-2}} ; B = 0,735 \text{ T.}$$

2- Le champ magnétique $\vec{B}$ est proportionnel à la force $\vec{F}$ qui elle-même est proportionnelle à la masse m : donc B et m sont proportionnels

$$\frac{B'}{B} = \frac{m'}{m} \Leftrightarrow B' = \frac{m'}{m} \cdot B$$

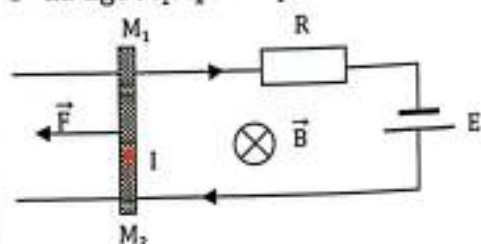
$$\text{Avec } m' = 0,1 \text{ g, on a : } B' = \frac{0,1}{30} \times 0,735 ; B' = 2,42 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

Commentaire :

Savoir appliquer le théorème des moments.

Résolution de l'exercice 3

1- La tige M_1M_2 se déplace suivant le sens de la force de Laplace.



2- Expression de la valeur de la force de Laplace

$$U_g = U_R ; E = RI ; I = \frac{E}{R}$$

$$\text{or } F = I.MN.B = I\ell B ; F = \frac{E\ell B}{R}$$

Commentaire :

La tige conductrice ferme le circuit. La résistance totale du circuit est R .

V- JE M'EXERCE

Exercices de fixation/ Application

1

- 1- Énonce la loi de Laplace.
- 2- Donne les caractéristiques de la force de Laplace qui s'exerce sur une portion d'un conducteur.

2 Écris, pour chacune des affirmations ci-dessous, le numéro suivi de la lettre V si l'affirmation est vraie ou de la lettre F si elle est fausse.

- 1- La force de Laplace est une action mécanique de contact.
- 2- Le point d'application de la force de Laplace est l'extrémité de la portion du conducteur plongé dans le champ magnétique uniforme.
- 3- Le point d'application de la force de Laplace est le milieu de la portion du conducteur plongé dans le champ magnétique uniforme.

- 4- Lorsque la portion ℓ du conducteur, orientée dans le sens du courant électrique, est colinéaire au vecteur-champ magnétique, l'intensité de la force de Laplace est nulle.
- 5- Lorsque la portion ℓ du conducteur, orientée dans le sens du courant électrique, est orthogonal au vecteur-champ magnétique, l'intensité de la force de Laplace est nulle.
- 6- L'intensité de la force de Laplace est maximale lorsque la portion ℓ du conducteur, orientée dans le sens du courant électrique, est orthogonal au vecteur-champ magnétique.
- 7- La balance de Cotton permet de déterminer l'intensité d'un champ électrique.
- 8- Les forces de Laplace sont responsables de la vibration de la membrane d'un haut-parleur.

3 Reproduis les diagrammes ci-dessous et relie chaque type de forces à son expression.

A	B
Force de Laplace •	• $\vec{F} = q\vec{V} \wedge \vec{B}$
Force de Lorentz •	• $\vec{P} = m\vec{g}$
Force électrique •	• $\vec{F} = I\vec{\ell} \wedge \vec{B}$
Poids d'un corps •	• $\vec{F} = q\vec{E}$

4 Reproduis le texte ci-dessous et remplace les pointillés par les mots ou groupes de mots suivants : milieu ; nulle ; électromagnétique ; le sens ; maximale ; champ magnétique

Une portion de conducteur parcourue par un courant et placée dans un champ magnétique uniforme subit une force appelée force de Laplace. La force de Laplace est une force dont le point d'application est le de la portion du conducteur

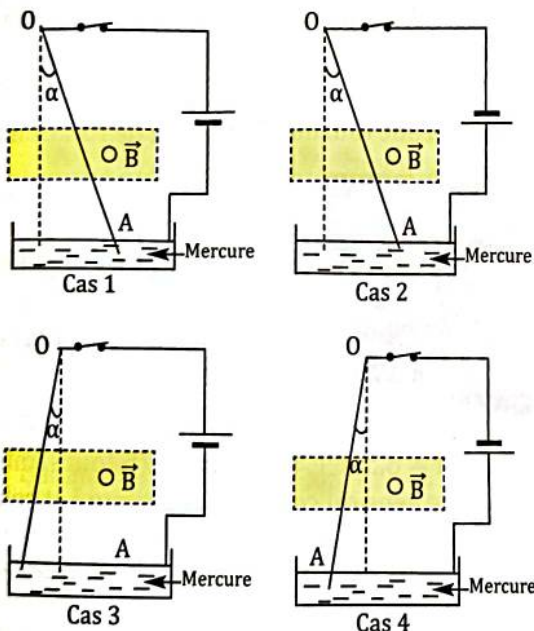
rectiligne plongée dans le uniforme. Lorsque la portion ℓ du conducteur, orientée dans sens du courant électrique, est orthogonal au vecteur-champ magnétique, l'intensité de la force de Laplace est Lorsqu'elle est colinéaire au vecteur-champ magnétique l'intensité de cette force est

5 Ordonne les mots ou groupes de mots ci-dessous de sorte à former une phrase ayant un sens.
traversée / électromagnétique / dans / uniforme / appliquée / appelée / et plongée / d'un conducteur / subit / par / en son milieu / Une portion / un champ magnétique / une force / un courant électrique / force de Laplace.

6 Explique en quelques lignes le fonctionnement d'un haut-parleur électromagnétique.

Exercices de renforcement/Approfondissement

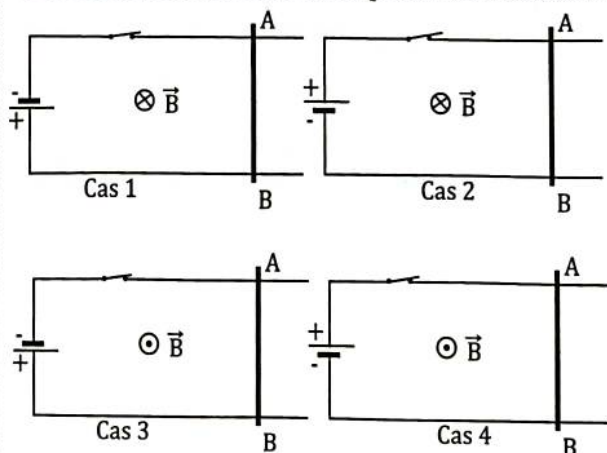
7 Une barre rigide OA dont une portion est plongée dans un champ magnétique $\vec{B}$ uniforme subit une déviation d'angle α (voir figures ci-dessous).



Précise le sens du champ magnétique $\vec{B}$ uniforme pour que la barre soit en équilibre.

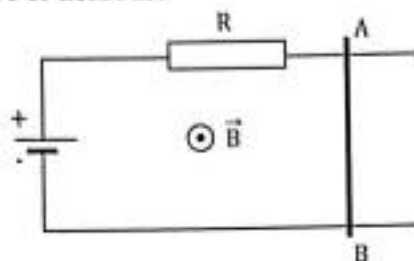
8 Une tige mobile AB est placée dans l'entrefer d'un aimant en U sur deux rails parallèles. La tige

se déplace sans frottements et l'ensemble formant un circuit fermé est alimenté par un générateur de courant continu. Ces différents montages ci-dessous sont réalisés dans quatre cas différents.



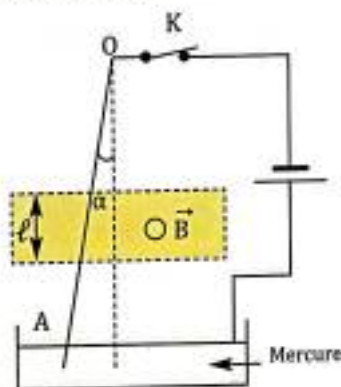
- 1- Précise, dans chacun des cas, le sens du courant électrique traversant la tige mobile AB.
- 2- Représente, dans chaque cas :
 - 2.1- le champ magnétique $\vec{B}$ uniforme ;
 - 2.2- la force de Laplace $\vec{F}$ exercée sur la tige mobile AB.
- 3- Déduis, dans chaque cas, le sens de déplacement de la tige mobile AB.

9 Une barre métallique AB de longueur ℓ glisse sans frottements sur des rails de Laplace. Le circuit est alimenté par un générateur de courant continu de f.é.m. E et de résistance interne négligeable. On suppose que la résistance totale du circuit est égale à R . L'ensemble est plongé dans un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ comme indiqué sur la figure ci-dessous.



- 1- Précise le sens de déplacement de la tige AB.
- 2- Exprime l'intensité I du courant en fonction de E et R .
- 3- Exprime l'intensité de la force de Laplace $\vec{F}$ s'exerçant sur la barre en fonction de E , R , B et ℓ .

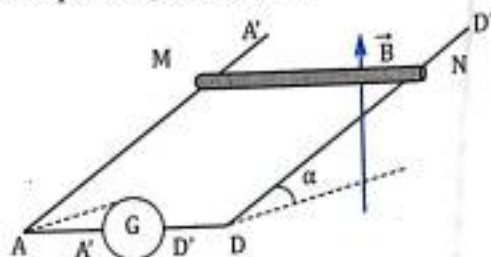
10 Une tige métallique homogène et rigide OA, de masse m peut pivoter sans frottements autour d'un axe fixe passant par O. L'extrémité inférieure libre de la tige métallique plonge dans du mercure contenu dans une cuve. La tige fait partie d'un circuit électrique comportant un générateur de courant et un interrupteur K. Lorsque on ferme l'interrupteur K, un courant électrique d'intensité I traverse la tige qui s'écarte de la verticale d'un angle α (voir figure).



Données : $m = 8 \text{ g}$; $\ell = 6 \text{ cm}$; $I = 5 \text{ A}$; $B = 5 \cdot 10^{-2} \text{ T}$.

- 1- Fais le bilan de toutes les forces extérieures qui exercent sur la tige métallique.
- 2- Représente sur le schéma chacune de ces forces et le sens de $\vec{B}$.
- 3- Détermine la valeur de l'angle α .

11 Deux rails parallèles AA' et DD', sont inclinés d'un angle α par rapport au plan horizontal d'un angle α . Une tige métallique MN de masse m peut se déplacer sans frottements le long de ces deux rails. L'ensemble du dispositif est plongé dans un champ magnétique $\vec{B}$ uniforme, vertical et orienté du bas vers le haut perpendiculairement à la tige métallique MN. La tige reste immobile lorsqu'elle est traversée par un courant électrique d'intensité I délivré par un générateur G.



Données : $m = 10 \text{ g}$; $\alpha = 15^\circ$; $MN = 1,18 \text{ cm}$;
 $B = 9,3 \cdot 10^{-2} \text{ T}$; $g = 9,8 \text{ N/kg}$.

- 1- Donne la polarité des bornes A' et D' du générateur G pour que la tige MN reste immobile.
- 2- Détermine l'intensité I du courant électrique qui traverse le circuit lorsque la tige est immobile.

12 Une roue de Barlow (Voir document ci-dessous) a sa partie inférieure placée dans un champ magnétique uniforme et perpendiculaire au plan de la roue. Un courant électrique traverse la roue suivant le rayon, $r = OA$ qui est en contact avec le mercure. La roue tourne à la vitesse de rotation n .



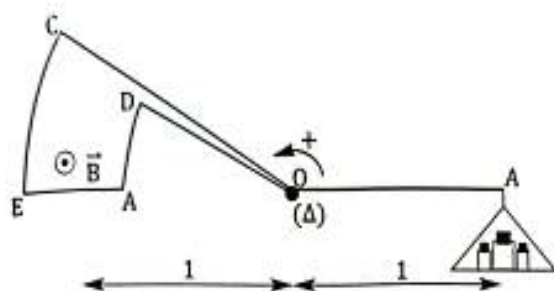
Données : $I = 8,5 \text{ A}$, $r = 9 \text{ cm}$, $n = 75 \text{ tours/min}$.

- 1- Précise le sens du courant électrique I et celui de rotation de la roue.
- 2- Détermine la valeur :
 - 2.1- F de la force de Laplace ;
 - 2.2- du moment de la force de Laplace par rapport à l'axe de rotation, en prenant le sens de rotation de la roue comme le sens positif choisi.
- 3- Détermine la puissance $\mathcal{P}$ de la roue de Barlow lorsque celle-ci effectue $k = 10$ tours.

Situations d'évaluation

13 Pendant une séance de Travaux Pratiques, votre professeur vous demande de déterminer l'intensité du champ magnétique créé par un aimant en U. Pour ce faire, il dispose d'une balance de Cotton comprenant :

- un bras de fléau OA relié à un plateau ;
- un circuit électrique rigide OCEAD fixé dans le plan vertical sur l'autre bras de fléau et alimenté par un dispositif approprié.



La partie OCEAD baigne dans le champ magnétique $\vec{B}$ uniforme créé par l'aimant en U.

Des masses marquées m sont progressivement placées dans le plateau et vous faites varier un courant d'intensité I dans le circuit de la balance. Les différentes valeurs de m et I sont consignées dans le tableau ci-dessous.

m (g)	0,3	0,5	0,7	1,0	1,2	1,5	1,8	2,0	2,2	2,4
I (A)	0,4	0,8	1,25	1,6	2,1	2,6	2,9	3,3	3,6	4

Données : $g = 10 \text{ N.kg}^{-1}$; $AE = d = 2 \text{ cm}$.

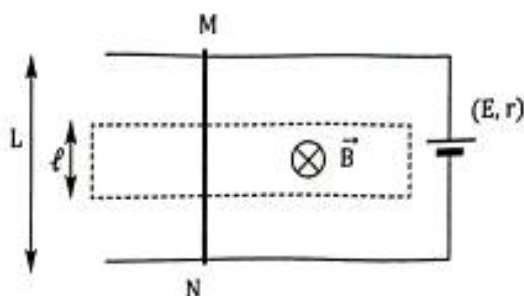
Échelles : $\begin{cases} 5 \text{ cm} \longleftrightarrow 1 \text{ A} & \text{en abscisses} \\ 5 \text{ cm} \longleftrightarrow 1 \text{ g} & \text{en ordonnées} \end{cases}$

- Représente sur le schéma, à l'équilibre :
 - le sens du courant dans la partie AE ;
 - les forces extérieures qui s'exercent sur le dispositif.
- Montre que la condition d'équilibre de la balance se réduit à $B = \frac{mg}{Id}$.
- Trace la courbe $m = f(I)$.
- Déduis-en la valeur B du champ magnétique $\vec{B}$.

14 Lors d'une séance de travaux dirigés, ton professeur te demande de représenter la force électromagnétique qui s'exerce sur une tige d'aluminium posée sur les rails de Laplace.

La tige, de masse m et de longueur totale L , peut se déplacer sans frottements sur les deux rails

parallèles (Voir schéma ci-dessous, vue de dessus). L'ensemble du dispositif est relié à un générateur de f.é.m. E et de résistance interne r . La résistance de la tige mobile MN est négligeable. Une portion de la tige MN de largeur ℓ est placée dans l'entrefer d'un aimant en U où règne un champ magnétique $\vec{B}$ uniforme, perpendiculaire, vertical et orienté vers le bas.



Données : $L = 12 \text{ cm}$; $\ell = 4 \text{ cm}$; $E = 12 \text{ V}$;

$r = 5 \Omega$; $B = 0,1 \text{ T}$.

Échelle : $1 \text{ cm} \longleftrightarrow 3 \cdot 10^{-3} \text{ N}$.

- Énonce la loi de Laplace.
- Représente le sens du courant électrique traversant le circuit.
- Détermine :
 - l'intensité I du courant électrique traversant le circuit ;
 - les caractéristiques de la force électromagnétique $\vec{F}$ s'exerçant sur la tige.
- Représente la force électromagnétique $\vec{F}$.

15 Un réparateur d'appareils électriques de ton quartier dispose dans son atelier d'un cadre carré MNRQ de masse totale m , de côté a , constitué d'un seul enroulement de fil de cuivre rigide, pouvant pivoter sans frottements autour de son gond dont l'axe (Δ) passe par le côté MQ. L'ensemble est plongé dans un champ magnétique $\vec{B}$ uniforme vertical ascendant. Un courant électrique d'intensité I traverse le cadre qui se déplace d'un angle α par rapport à la verticale pour atteindre sa nouvelle position d'équilibre. Surpris de ses observations, il te sollicite pour l'aider à mieux comprendre ce dispositif.

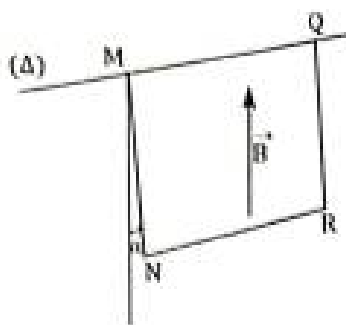


Schéma 1 : vue en perspective

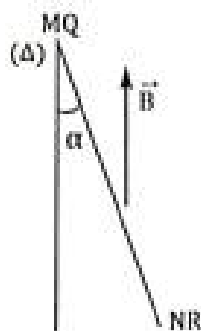


Schéma 2 : vue de profil

Données : $m = 16 \text{ g}$; $a = 0,2 \text{ m}$; $g = 9,8 \text{ N.kg}^{-1}$;
 $\alpha = 21^\circ$; $B = 0,1 \text{ T}$.

- 1- Reproduis et représente sur le schéma 1 le sens du courant électrique traversant le cadre.
- 2- Fais le bilan de toutes les forces extérieures appliquées au cadre.
- 3- Représente le poids $\vec{P}$ du cadre et la force de Laplace $\vec{F}$ exercée sur le côté NR du cadre sur le schéma 2.
- 4- Détermine l'intensité I du courant électrique qui traverse le cadre.

VI- RENDEZ-VOUS DES CURIEUX

LA FORCE DE LAPLACE DANS LA VIE COURANTE : LES HAUTS PARLEURS, LES MOTEURS ...

Le haut-parleur électrodynamique et les moteurs restent l'une des applications couramment utilisées et basées sur la force de Laplace.

Le haut-parleur électrodynamique est constitué d'un aimant et d'une bobine mobile qui se déplace autour de cet aimant. Dans le haut-parleur, la bobine de fil n'est pas reliée à un générateur de courant continu mais à un générateur de courant alternatif qui n'est pas forcément sinusoïdal. Lorsque le courant circule dans la bobine, la

force de Laplace créée est orientée dans un sens comme dans l'autre. La bobine se déplace dans un mouvement de va et vient à la même fréquence de la tension alternative. La membrane du haut-parleur qui est reliée à la bobine vibre donc à la même fréquence de la tension.

L'énergie électrique est ainsi transformée en énergie mécanique. La membrane vibrante se trouve au contact de l'air. Le mouvement de va et vient de cette membrane met l'air environnant en vibration. Une alternance de surpressions et de sous pressions se propage. Un son se propage alors dans l'air. L'énergie mécanique est ainsi transformée en énergie sonore.



Le moteur est constitué d'un disque de cuivre mobile autour d'un axe fixe horizontal passant par son centre effleurant sur sa partie inférieure du mercure contenu dans une cuve. Un générateur permet d'alimenter le circuit en faisant passer un courant électrique entre l'axe et le point de contact de la partie inférieure du disque avec le mercure. Cette partie inférieure du disque se trouve dans l'entrefer d'un aimant en U créant un champ magnétique dont les lignes horizontales sont perpendiculaires au plan du disque. Ce dernier tourne, sous l'action d'une force de Laplace, lorsque le courant et le champ magnétique sont simultanément établis.

LEÇON

8

AUTO-INDUCTION

TABLEAU DES HABILETÉS ET DES CONTENUS

HABILETÉS	CONTENUS
Définir	le flux propre.
Connaître	l'expression du flux propre $\Phi_p = LI$.
Expliquer	le phénomène d'auto-induction.
Connaître	la loi de l'auto-induction.
Déterminer	l'inductance L d'un solénoïde.
Connaître	- l'expression de l'inductance L d'un solénoïde. - l'unité d'inductance.
Connaître	l'expression de : - la tension aux bornes d'une bobine ; - l'énergie magnétique emmagasinée dans une bobine.
Déterminer	- la force électromotrice d'auto-induction. - la tension aux bornes d'une bobine. - l'énergie électromagnétique emmagasinée dans une bobine.
Appliquer	la loi de l'auto-induction.

NOTIONS ESSENTIELLES

- Auto-induction
- Flux propre
- Inductance
- Force électromotrice d'auto-induction
- Énergie électromagnétique

SITUATION D'APPRENTISSAGE

Au cours d'une visite de courtoisie qu'effectue un élève chez son ami, tous deux en classe de terminale, l'élève apprend du commentateur d'une émission scientifique qu'une bobine s'oppose à l'établissement ou à l'annulation de courant électrique dans un circuit. De retour en classe, il partage cette information avec ses camarades. Pour mieux comprendre le phénomène, sous la supervision de leur professeur, ces élèves décident d'expliquer le phénomène d'auto-induction, de déterminer la f-é-m d'auto-induction, la tension aux bornes d'une bobine, l'énergie emmagasinée dans une bobine et d'appliquer la loi de l'auto-induction.



I- ACTIVITÉS

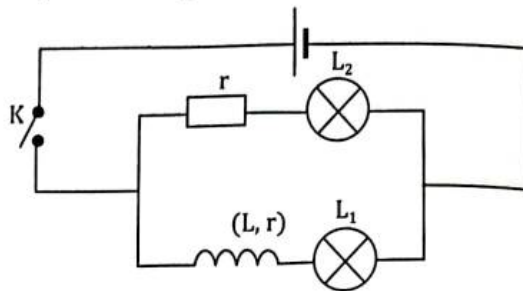
ACTIVITÉ 1 : METTRE EN ÉVIDENCE LE PHÉNOMÈNE D'AUTO-INDUCTION

1- Expérience 1

Réalise le circuit électrique ci-dessous, avec les lampes électriques L_1 et L_2 identiques.



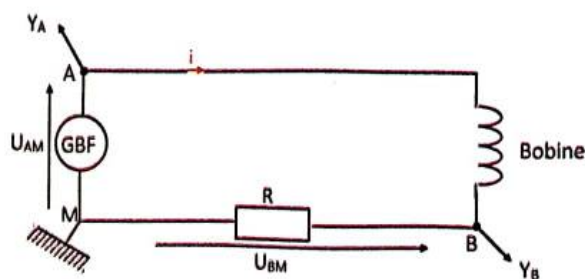
Document 1 : Retard à l'allumage d'une lampe électrique



- 1.1- Ferme l'interrupteur K et observe l'état de chacune des deux lampes.
- 1.2- Ouvre l'interrupteur K et observe l'état de chacune des deux lampes.
- 1.3- Nomme le phénomène mis en évidence.
- 1.4- Quel est le dipôle responsable de ce phénomène ?

2- Expérience 2

Réalise le montage du circuit électrique ci-dessous avec le branchement de l'oscilloscope bicourbe.



Document 2 : Circuit de visualisation à l'oscilloscope des tensions u_{AM} et u_{BM}

- 2.1- Visualise à l'oscilloscope, la tension u_{AM} délivrée par le générateur de basses fréquences (GBF) et la tension u_{BM} aux bornes du conducteur ohmique.
- 2.2- Interprète l'installation et la rupture du courant dans le circuit.
- 2.3- Conclus.

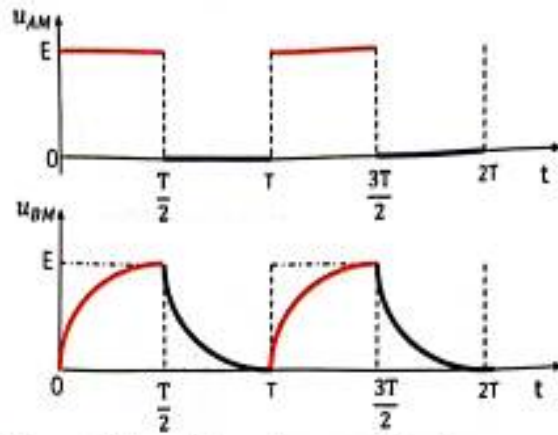
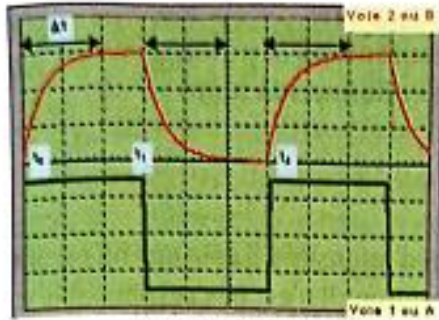
Je fais le point de l'activité

1- Expérience 1 : retard à l'allumage de la lampe électrique

- Quand on ferme l'interrupteur K, la lampe L_2 s'allume instantanément tandis que L_1 s'allume progressivement avant d'avoir le même éclat que L_2 .
- Quand on ouvre l'interrupteur K, la lampe L_2 s'éteint instantanément tandis que L_1 s'éteint quelques instants après.
- Le phénomène mis en évidence est l'auto-induction.
- Le dipôle responsable de ce phénomène est la bobine.

Remarque : pour accentuer le retard à l'allumage de la lampe, on utilise une bobine avec un noyau de fer.

2. Expérience 2 : Visualisation à l'oscilloscope de u_{AM} et u_{BM}



Document 3 : Visualisation de l'installation et de l'annulation du courant électrique

- Lorsque la tension u_{AM} aux bornes du GBF passe de 0 à E, l'intensité du courant électrique dans le conducteur ohmique R croît progressivement pour atteindre sa valeur maximale au bout d'un certain temps.
- Lorsque la tension u_{AM} aux bornes du GBF s'annule instantanément, l'intensité du courant électrique décroît progressivement pour s'annuler au bout d'un certain temps.
- L'installation et l'annulation du courant électrique se font progressivement dans la même durée. On observe une opposition systématique de toute variation du courant électrique dans la bobine.

• Conclusion

La bobine retarde les variations (installation ou annulation) du courant électrique : c'est le phénomène de l'auto-induction.

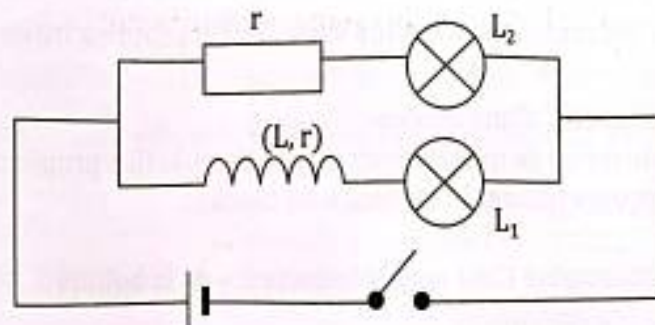
J'évalue mes acquis



On considère le circuit schématisé ci-contre.

Les deux lampes électriques L_1 et L_2 sont identiques. La bobine et le conducteur ohmique ont la même résistance.

Quand on ferme l'interrupteur K, l'une des lampes s'allume avant l'autre.



- 1- Indique la lampe qui s'allume la première.
- 2- Explique le retard à l'allumage de l'autre lampe.
- 3- Nomme le phénomène observé.

ACTIVITÉ 2 : DÉFINIR LE FLUX PROPRE ET DÉTERMINER L'INDUCTANCE D'UNE BOBINE

Considère la bobine du circuit de l'expérience 1. Le courant qui la traverse crée un champ magnétique dans son espace intérieur. On dit que cette bobine est traversée par un flux propre du champ magnétique dû au courant qui la parcourt.

- 1- Définis le flux propre du champ magnétique à travers un circuit.
- 2- Comment varie le flux propre de la bobine lorsque le courant qui la traverse varie ?
- 3- Détermine l'expression de l'inductance L d'une bobine et donne son unité.

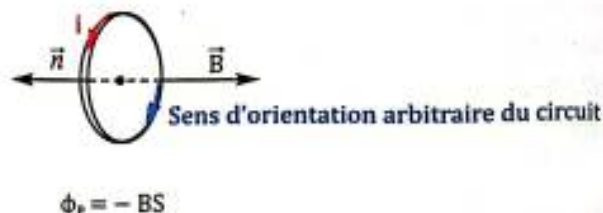
Je fais le point de l'activité**1- Définition et variation du flux propre**

Lorsqu'un circuit filiforme (C) est parcouru par un courant d'intensité i , il crée un champ magnétique $\vec{B}$ qualifié de propre, par opposition à un champ extérieur dont il n'est pas responsable mais dans lequel il peut être placé.

On appelle flux propre Φ_p à travers le circuit, le flux de ce champ propre créé par ce circuit.

Soit une surface orientée $\vec{S}$ (grâce à la règle de la main droite), soit un champ magnétique $\vec{B}$ qui traverse cette surface. Le flux du champ $\vec{B}$ à travers la surface $\vec{S}$ s'écrit :

$$\Phi_p = \vec{B} \cdot \vec{S} = \vec{B} \cdot \vec{n} S \text{ avec } \vec{S} = \vec{n} S$$



- Pour une spire :

$\Phi_p = \vec{B} \cdot \vec{n} S$ avec $\vec{n}$ vecteur unitaire normale au plan de la spire ou au circuit et S la surface de la spire ou du circuit.

Le flux propre Φ_p s'exprime en weber de symbole (Wb), avec B en tesla (T) et S en m^2

Remarque : pour un circuit parcouru par un courant i , on choisit de préférence le sens du courant comme sens d'orientation du circuit.

- Pour N spires :

$$\Phi_p = N \vec{B} \cdot \vec{n} S$$

- Lorsque l'intensité du courant dans la bobine varie, le flux propre à travers cette bobine varie.

2- Expression de l'inductance L d'une bobine

En absence d'un noyau de fer ou de matière ferromagnétique, le flux propre du champ magnétique à travers un circuit est proportionnel à l'intensité du courant.

$$\Phi_p = L i$$

Le coefficient de proportionnalité L est appelé inductance de la bobine

Pour une bobine longue (ou solénoïde)

$$\Phi_p = L i = N B S = \mu_0 \frac{N^2}{\ell} S i \text{ avec } B = \mu_0 \frac{N}{\ell} i$$

$$\text{On pose } L = \mu_0 \frac{N^2}{\ell} S \quad L = \mu_0 n^2 \ell S$$

L'inductance L s'exprime en henry de symbole H.

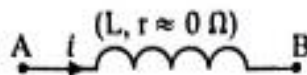


Un solénoïde, de longueur $\ell = 0,5 \text{ m}$ et de diamètre $d = 5 \text{ cm}$, comportant $N = 2.10^4$ spires, est traversé par un courant d'intensité $I = 100 \text{ mA}$.

- 1- Détermine le flux à travers les spires du solénoïde.
- 2- Calcule l'inductance L du solénoïde.

ACTIVITÉ 3 : DÉTERMINER LA FORCE ÉLECTROMOTRICE (f.é.m.) D'AUTO-INDUCTION ET LA TENSION AUX BORNES D'UNE BOBINE

Le dipôle (A, B) schématisé ci-dessous est une bobine d'inductance L et de résistance interne négligeable. Il est traversé par un courant d'intensité i variable dans le temps.



- 1- Définis le rôle joué par la bobine lorsqu'elle est parcourue par un courant électrique d'intensité i variable dans le temps.
- 2- Dédus-en l'expression de la force électromotrice (f.é.m.) d'auto-induction e .
- 3- Fais le schéma équivalent de la bobine.
- 4- Établis l'expression de la tension u_{AB} aux bornes d'une :
 - 4.1- bobine résistive ;
 - 4.2- bobine idéale.

Je fais le point de l'activité

1- Rôle joué par la bobine

Lorsque l'intensité i du courant varie au cours du temps, il apparaît dans la bobine un courant induit qui tend à s'opposer aux variations de i et du flux propre ϕ_p .

La bobine se comporte comme un générateur de force électromotrice e appelée force électromotrice (f.é.m.) d'auto-induction e .

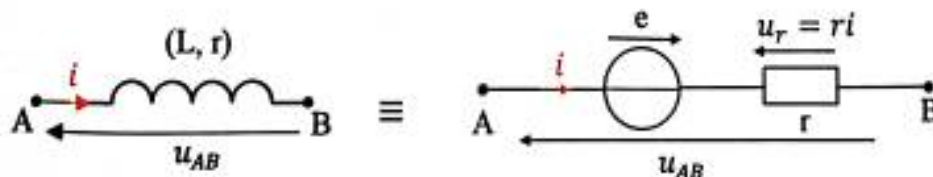
2- Expression de la force électromotrice

Étant donné que le courant induit tend à s'opposer à ses variations, donc aux variations de la f.é.m. d'auto-induction e , on peut en déduire l'expression suivante de e .

$$e = - \frac{d\phi}{dt} = - L \frac{di}{dt}. \text{ C'est la loi de Faraday-Lenz.}$$

La force électromotrice d'auto-induction e est une grandeur algébrique et s'exprime en volt (V).

3- Schéma équivalent d'une bobine et expression de la tension u_{AB} aux bornes d'une bobine



L'expression de la tension u_{AB} aux bornes d'une bobine résistive (L, r) en convention récepteur :

$$u_{AB} = ri - e = ri + L \frac{di}{dt}$$

L'expression de la tension u_{AB} aux bornes d'une bobine idéale ($r = 0$) est :

$$u_{AB} = -e = L \frac{di}{dt}$$

J'évalue mes acquis

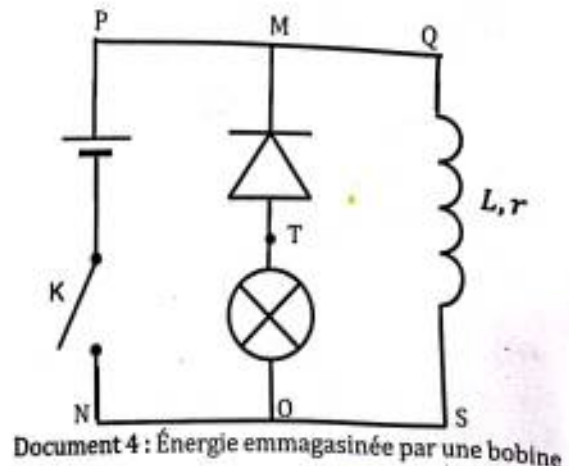


Dans une bobine d'inductance $L = 0,5 \text{ H}$ et de résistance négligeable, l'intensité du courant électrique varie de $\Delta i = 0,1 \text{ A}$ pendant une durée $\Delta t = 100 \text{ ms}$. Calcule la force électromotrice d'auto-induction e dans cette bobine.

ACTIVITÉ 5 : DÉTERMINER L'ÉNERGIE EMMAGASINÉE DANS UNE BOBINE

Tu utilises le montage schématisé sur le document 4.

- 1- Indique, lorsque l'interrupteur est fermé :
 - 1.1- la branche dans laquelle circule le courant électrique ;
 - 1.2- l'état de la lampe.
- 2- Laisse l'interrupteur fermé pendant un certain temps puis ouvre le.
 - 1.1- Indique l'état de la lampe.
 - 1.2- Précise l'origine de l'énergie reçue par la lampe.
 - 1.3- Détermine l'expression :
 - 2.3.1- de la puissance reçue par la bobine ;
 - 2.3.2- de l'énergie emmagasinée par la bobine.



Document 4 : Énergie emmagasinée par une bobine

Je fais le point de l'activité

1- Interrupteur fermé

- Le courant électrique circule dans la branche (PMQSON) contenant la bobine. En effet, il est bloqué dans la branche (MTO) contenant la diode.
- La lampe reste éteinte car la diode est non passante.

2- Interrupteur ouvert après un moment de fermeture

À l'ouverture du circuit après un moment de fermeture, la lampe s'allume pendant quelques instants.

Elle a donc reçu de l'énergie ; cette énergie est fournie par la bobine.

La puissance reçue par la bobine est :

$$P = u \cdot i \quad \text{Or } u = ri + L \frac{di}{dt}, \text{ donc } P = ri^2 + Li \frac{di}{dt}$$

$$\begin{cases} ri^2 \text{ est la puissance dissipée sous forme d'effet Joule} \\ Li \frac{di}{dt} \text{ est la puissance magnétique} \end{cases}$$

L'énergie E_e reçue par la bobine est : $P = \frac{dE_e}{dt}$, $(dE_e = P dt = (ri^2 + Li \frac{di}{dt}) dt)$

Ce qui donne : $E_e = ri^2 t + \frac{1}{2} Li^2$.

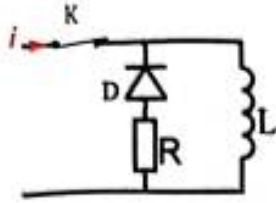
$\frac{1}{2} Li^2$ est l'énergie emmagasinée dans la bobine. $ri^2 t$ est l'énergie dissipée sous forme de chaleur pendant le passage du courant.

Remarque

Dans le cas où la lampe et la diode ne sont pas montées en dérivation aux bornes de la bobine, à l'ouverture du circuit, cette énergie est restituée sous forme d'étincelles dites étincelles de rupture entre les bornes de l'interrupteur.

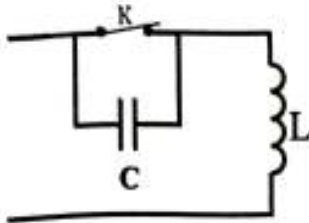
pour éviter les étincelles de rupture il faut :

- mettre en parallèle avec la bobine, une résistance en série avec une diode ;



Lorsqu'on ouvre l'interrupteur K, le courant de rupture s'amortit à travers la résistance.

- mettre un condensateur aux bornes de l'interrupteur.



Lorsqu'on ouvre l'interrupteur K, il y a échange d'énergie entre la bobine et le condensateur.

J'évalue mes acquis



Dans une bobine d'inductance $L = 1 \text{ H}$ et de résistance négligeable, l'intensité du courant électrique vaut de $i = 0,5 \text{ A}$ à la date t .

Calcule l'énergie magnétique emmagasinée dans cette bobine à la date t .

II- RÉSUMÉ DE COURS

- Une bobine, placée dans un circuit électrique, retarde l'installation ou la rupture du courant dans ce circuit. C'est le phénomène d'auto-induction.
- Une bobine, à N spires, traversée par un courant d'intensité i , est source d'un champ magnétique $\vec{B}$. Ce champ crée un flux propre, noté Φ_p , d'expression :

$$\Phi_p = N\vec{B}\vec{S}$$

Φ_p s'exprime en weber (Wb), S : surface de la section de la bobine (m^2) ; B en tesla (T).

Le flux propre Φ_p est proportionnel à l'intensité du courant i .

$$\Phi_p = Li$$

Le coefficient de proportionnalité L est appelé **inductance** ou **auto-inductance** de la bobine. Il s'exprime en henry (H).

Pour une bobine, de longueur ℓ , constituée de N spires de surface moyenne S : $L = \mu_0 \frac{N^2}{\ell} S$.

- Loi de Faraday-Lenz : La force électromotrice d'auto-induction e est proportionnelle à l'opposée de la dérivée de l'intensité du courant par rapport au temps. On a : $e = -L \frac{di}{dt}$.
 e s'exprime en volt (V) ; i en ampère (A) et L en henry (H).
- La tension aux bornes d'une bobine de résistance interne r et d'inductance L , parcourue par un courant variable d'intensité i est : $u_{AB} = ri - e = ri + L \frac{di}{dt}$.
- L'énergie magnétique emmagasinée dans la bobine parcourue par un courant d'intensité i est :
 $E_m = \frac{1}{2} Li^2$. E_m s'exprime en joule (J) ; L en henry (H) ; i en ampère (A)

III- MÉTHODES

Comment exploiter correctement les oscillogrammes.

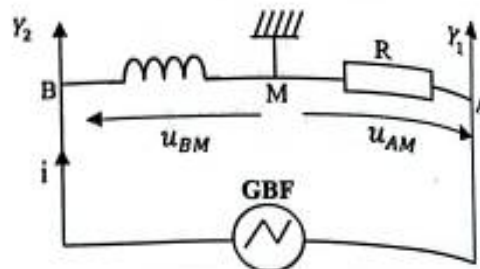
1- Reconnaître les tensions visualisées :

Partir de la masse M jusqu'au point d'entrée utilisée.

Exemple.

Pour le schéma ci-contre :

- l'entrée Y_1 est en A, la tension visualisée (en allant de M à A) est égale à u_{AM} ;
- l'entrée Y_2 est en B, la tension visualisée (en allant de M à B) est égale à u_{BM} .



2- Le schéma du circuit et les représentations de flèches tensions en convention récepteur permettent d'exprimer les tensions visualisées.

$$u_{AM} = -Ri ; i = -\frac{u_{AM}}{R}$$

$$u_{BM} = -e = L \frac{di}{dt} = -L \frac{du_{AM}}{Rdt} = -\frac{L}{R} \frac{du_{AM}}{dt}$$

IV- EXERCICES RÉSOLUS

Exercice 1

Une bobine d'inductance $L = 100 \text{ mH}$ est parcourue par un courant d'intensité $I = 1 \text{ A}$. Calcule le flux propre ϕ_p qui traverse cette bobine.

Exercice 2

Une bobine d'inductance $L = 0,15 \text{ H}$ emmagasine une énergie $E_m = 0,4 \text{ J}$, lorsqu'elle est parcourue par un courant continu. Calcule l'intensité I de ce courant.

Exercice 3

Une bobine d'inductance $L = 0,5 \text{ H}$ est parcourue par un courant d'intensité $I = 8 \text{ A}$. On ouvre le circuit en $\Delta t = 5 \text{ ms}$.

- 1- Détermine l'énergie magnétique stockée dans la bobine en régime permanent.
- 2- Calcule la puissance électrique libérée pendant l'ouverture du circuit.

Résolution de l'exercice 1

Le flux propre ϕ_p : $\phi_p = LI$

$$\text{AN : } \phi_p = 100 \cdot 10^{-3} \times 1 \quad \phi_p = 0,1 \text{ Wb}$$

Commentaire :

Connaître et appliquer l'expression du flux propre (se référer au cours).

Résolution de l'exercice 2

L'intensité I

$$E_m = \frac{1}{2} L I^2 ; I^2 = \frac{2E_m}{L}$$

$$\Rightarrow I = \sqrt{\frac{2E_m}{L}}$$

$$\text{AN : } I = \sqrt{\frac{2 \times 0,4}{0,15}} \quad I = 2,3 \text{ A.}$$

Commentaire :

Savoir déduire de l'expression $E_m = \frac{1}{2} L I^2$, l'expression de $I = \sqrt{\frac{2E_m}{L}}$

Résolution de l'exercice 3

1- L'énergie magnétique stockée dans la bobine en régime permanent.

$$E_m = \frac{1}{2} L I^2$$

$$\text{AN : } E_m = \frac{1}{2} \times 0,5 \times 8^2 \quad E_m = 16 \text{ J}$$

2- Puissance libérée

$$P = \frac{E_m}{\Delta t}$$

$$P = \frac{16}{5 \cdot 10^{-3}} \quad P = 3200 \text{ W}$$

Commentaire :

- Connaître et appliquer l'expression : $E_m = \frac{1}{2} L I^2$ de l'énergie magnétique stockée dans une bobine. (Se référer au cours).
- Connaître et appliquer l'expression de la puissance libérée.

V- JE M'EXERCE

Exercices de fixation/ Application

1

- 1- Définis le flux propre Φ_p
- 2- Donne l'expression du flux propre Φ_p
- 3- Explique le phénomène d'auto-induction.

2 Recopie, pour chacune des affirmations ci-dessous, le numéro et écris à la suite la lettre V si l'affirmation est vraie ou la lettre F si elle est fausse.

- 1- L'inductance L d'une bobine dépend du temps et de l'intensité du courant.
- 2- Toute variation du flux propre à travers un circuit engendre une f.é.m. auto-induite.

3- La f.é.m. d'auto-induction est proportionnelle à la dérivée de l'intensité de courant par rapport au temps.

4- L'énergie magnétique emmagasinée par une bobine d'inductance L est proportionnelle au carré de l'intensité du courant qui la traverse.

3 Relie chaque grandeur physique du diagramme A à son expression dans le diagramme B après les avoir reproduit.

A	B
F.É.m. d'auto-induction •	• $\frac{\Phi}{I}$
Inductance L •	• $ri + L \frac{di}{dt}$
Énergie magnétique E_m •	• $\frac{1}{2} Li^2$
Tension u aux bornes d'une bobine •	• $\frac{L}{r}$
	• $-L \frac{di}{dt}$

4 Une bobine d'inductance $L = 100 \text{ mH}$ est parcourue par un courant d'intensité $I = 200 \text{ mA}$. L'énergie emmagasinée par cette bobine est :
a) 2 mJ ; b) 4 mJ ; c) 10 mJ ; d) 20 mJ.

Recopie la lettre correspondante à la bonne réponse.

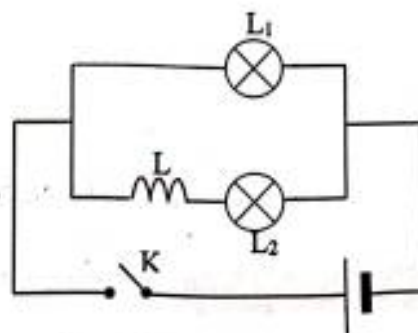
5 L'inductance L d'une bobine est une grandeur qui la caractérise.

Son unité est :

a) le farad ; b) l'henry ; c) le tesla ; d) le weber.

Recopie la lettre correspondante à la bonne réponse.

6 L_1 et L_2 sont deux lampes identiques. L_2 est en série avec une bobine d'inductance L et de résistance négligeable. On ferme l'interrupteur K . Écris, pour chacune des affirmations ci-dessous, le numéro suivi de vrai si l'affirmation est vraie ou de faux si elle est fausse.



- 1- Les deux lampes L_1 et L_2 s'allument en même temps.
- 2- La lampe L_1 s'allume avec un léger retard sur la lampe L_2 .
- 3- La lampe L_2 s'allume avec un léger retard sur la lampe L_1 .

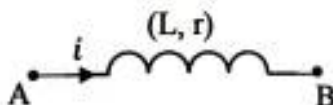
Exercices de renforcement/ Approfondissement

7 Détermine l'inductance L d'un solénoïde de longueur $\ell = 0,5 \text{ m}$, de rayon $r = 2,5 \text{ cm}$ et comportant $n = 2 \cdot 10^4$ spires/mètre.

Donnée : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ S.I}$

8 On considère la bobine ci-dessous. L'intensité du courant a pour expression : $i = 0,1 + 6t$ (i en A et t en s).

L'inductance vaut $L = 20 \text{ mH}$ et $r = 10 \Omega$.



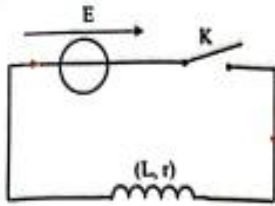
- 1- Détermine la force électromotrice d'auto-induction dans la bobine.

- 2- Donne l'expression de la tension u_{AB} en fonction du temps.

9 Un circuit contient une bobine longue de $\ell = 50 \text{ cm}$, comportant $N = 1000$ spires de diamètre moyen $d = 5 \text{ cm}$.

- 1- Calcule l'inductance L de cette bobine.
- 2- A la fermeture du circuit, l'intensité du courant varie linéairement de 0 à 6 A en $\Delta t = 0,5 \text{ s}$.
 - 2.1- Établis l'expression de l'intensité du courant en fonction du temps.
 - 2.2- Calcule la force électromotrice d'auto-induction qui apparaît dans la bobine.

10 Un circuit électrique comprend, en série, un générateur idéal de force électromotrice $E = 6 \text{ V}$ et une bobine d'inductance $L = 10 \text{ mH}$ et de résistance interne $r = 2 \Omega$.



- 1- On ferme l'interrupteur K.
 - 1.1- Montre que $E = ri + L \frac{di}{dt}$.
 - 1.2- Déduis-en la valeur i_m de l'intensité du courant en régime permanent.
 - 1.3- Calcule, alors l'énergie stockée dans la bobine.
- 2- On ouvre à nouveau l'interrupteur K.
 - 2.1- Note ce que l'on observe entre les contacts de l'interrupteur.
 - 2.2- Note ce que devient l'énergie stockée dans la bobine.

11

1- Soit un solénoïde supposé comme une bobine de longueur $\ell = 40 \text{ cm}$, comportant $N = 1250$ spires de rayon $R = 2 \text{ cm}$, parcouru par un courant $I = 5 \text{ A}$. On donne $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ S.I.}$

1.1- Calcule le champ magnétique uniforme créé au centre de la bobine par le passage du courant.

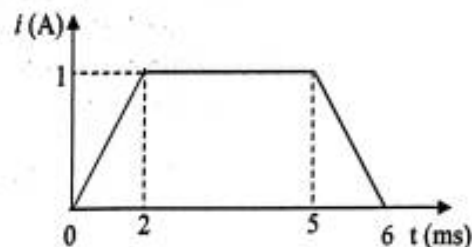
1.2- Calcule le flux propre de cette bobine.

1.3- Détermine l'inductance L du solénoïde.

2- Le solénoïde est à présent parcouru par un courant d'intensité variant en fonction du temps comme l'indique la figure ci-dessous.

2.1- Détermine la force électromotrice auto-induite e qui apparaît aux bornes de la bobine pour chacune des trois phases.

2.2- Trace le graphe $e = f(t)$ pour $t \in [0; 6\text{ms}]$.



Situations d'évaluation

12 Lors d'un contrôle continu, le professeur d'une classe de Terminale C demande aux candidats de déterminer la force électromotrice d'auto-induction et l'énergie magnétique emmagasinée dans une bobine de longueur ℓ , de rayon r comportant N spires pendant une durée Δt . La bobine est parcourue par un courant d'intensité $i = 3t^2$.

Données : $\ell = 50 \text{ cm}$; $r = 4 \text{ cm}$; $N = 2800$ spires ; $\Delta t = 1 \text{ s}$; $\pi^2 = 10$.

Tu participes à ce contrôle continu.

- 1- Calcule l'inductance L de la bobine.
- 2- Donne l'expression de la force électromotrice d'auto-induction e en fonction de t .
- 3- Détermine, pendant la durée Δt :
 - 3.1- la force électromotrice de la bobine ;
 - 3.2- l'énergie magnétique emmagasinée dans la bobine.

13 Lors d'une séance de travaux pratiques, ton groupe est chargé de déterminer l'inductance d'un solénoïde (A, C) et les variations de la tension à ses bornes lorsqu'il est parcouru par un courant variable. Ce solénoïde de longueur $\ell = 41,2 \text{ cm}$ et de résistance négligeable, comporte $N = 400$ spires de rayon $r = 2,5 \text{ cm}$.

Dans une première expérience, ton groupe branche aux bornes du solénoïde un générateur de courant continu délivrant un courant d'intensité $I = 5 \text{ A}$ (voir figure 1).

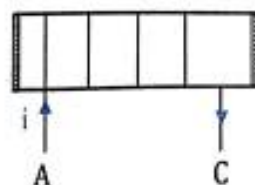


Figure 1

Dans une seconde expérience, le groupe remplace le générateur de courant continu par un générateur de courant variable dont l'intensité visualisée est représentée comme suit (voir figure 2). L'inductance du solénoïde est dans cette expérience $L = 10^{-3} \text{ H}$.

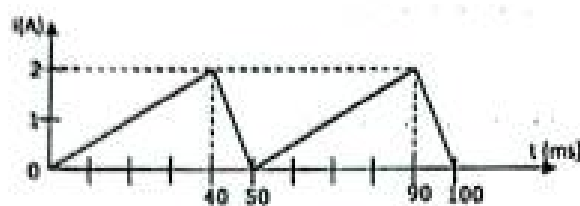


Figure 2



Figure 3

Données :

Tu utiliseras au besoin l'échelle : 1 cm représente 50 mV ; 1 cm représente 10 ms.

Tu es le rapporteur de ton groupe.

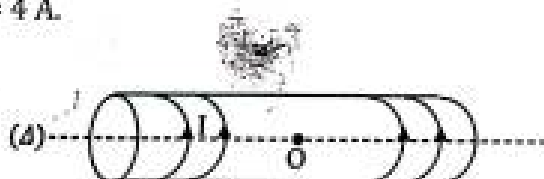
- 1- Représente quelques lignes du champ magnétique à l'intérieur du solénoïde ainsi que le vecteur champ $\vec{B}$ (direction et sens).
- 2- Détermine, dans le cas de l'expérience 1 :
 - 2.1- l'intensité B du champ magnétique $\vec{B}$ à l'intérieur du solénoïde ;
 - 2.2- le flux propre Φ_p de la bobine ;
 - 2.3- l'inductance L de la bobine.
- 3- Détermine, dans le cas de l'expérience 2, les expressions de la tension u_{AC} sur une période : $t \in [0; 50 \text{ ms}]$.
- 4- Trace la courbe $u_{AC}(t)$.

14 Dans le but de déterminer l'inductance L d'une bobine par les méthodes théorique et expérimentale, ton groupe réalise les études suivantes.

Étude théorique

Ton groupe dispose d'un solénoïde de longueur $\ell = 1 \text{ m}$ et de rayon $r = 2,25 \text{ cm}$, comportant $N = 1000$ spires.

Ce solénoïde est parcouru par un courant d'intensité $I = 4 \text{ A}$.



Étude expérimentale

Afin de vérifier la valeur L de l'inductance du solénoïde, tu l'insères dans un circuit électrique comportant un conducteur ohmique de résistance $R = 100 \Omega$ et tu procèdes à l'expérience schématisée ci-dessous. La figure 1 représente le montage de l'expérience et la figure 2 indique ce qui est observé sur l'écran d'un oscilloscope bicourbe.

La résistance interne du solénoïde est négligeable.

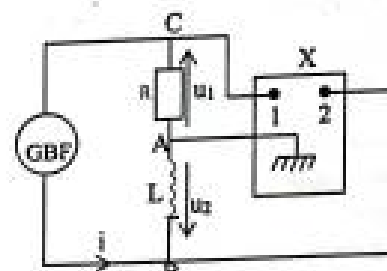


Figure 1

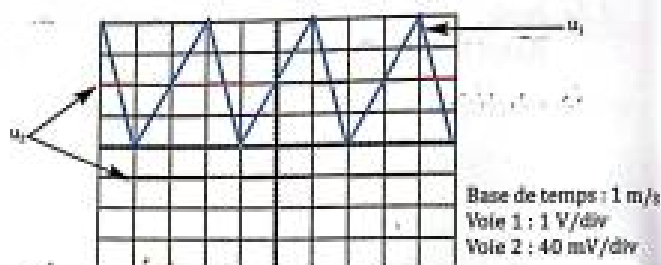


Figure 2

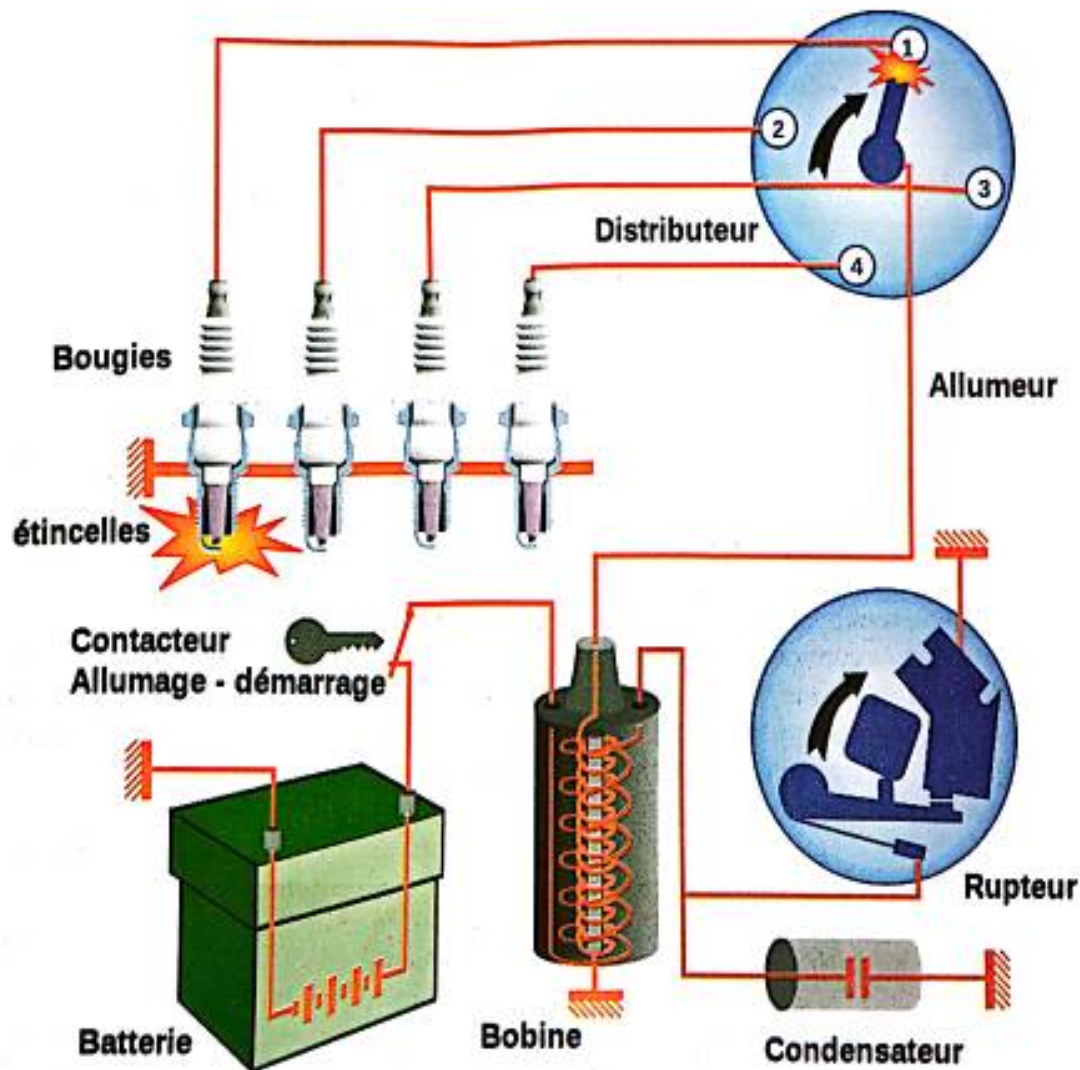
Données : $\pi^2 = 10$; $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ SI}$

Tu es chargé (e) de rédiger le rapport.

- 1- Indique les grandeurs observées sur les voies 1 et 2.
- 2- Détermine :
 - 2.1- l'inductance L de ce solénoïde ;
 - 2.2- la valeur du champ magnétique $\vec{B}$ à l'intérieur du solénoïde ;
 - 2.3- le flux propre Φ_p du champ $\vec{B}$ à travers le solénoïde.
- 3- Détermine :
 - 3.1- les expressions de u_2 en fonction de L , R et $\frac{du_1}{dt}$ sur une période ;
 - 3.2- à partir du graphe de u_2 , la valeur de l'inductance L du solénoïde.
- 4- Compare la valeur de L à celle calculée à la question 2.1.

VI- RENDEZ-VOUS DES CURIEUX

L'auto-induction permet d'arrêter la croissance de la tension dans les circuits inductifs. Elle s'applique entre autres au circuit d'allumage d'une voiture ou d'un moteur fonctionnant à l'essence. Un interrupteur mécanique est installé entre la bobine et la masse. Cet interrupteur, au moment où une étincelle doit se former dans le cylindre pour allumer le carburant, rompt le circuit d'alimentation de la bobine. Ensuite l'énergie stockée dans le cœur de la bobine provoque une augmentation de la f.e.m. d'auto-induction et la tension sur l'électrode de la bougie augmente, provoquant la combustion carburant-air, permettant ainsi l'allumage de la voiture.



LEÇON

9

MONTAGES DÉRIVATEUR ET INTÉGRATEUR

TABLEAU DES HABILETÉS ET DES CONTENUS

HABILETÉS	CONTENUS
Connaître	les caractéristiques d'un amplificateur opérationnel.
Déterminer	la relation entre la tension d'entrée et la tension de sortie : - d'un montage dérivateur ; - d'un montage intégrateur.
Distinguer	un montage dérivateur d'un montage intégrateur.
Interpréter	• le montage dérivateur. • le montage intégrateur.
Dégager	l'intérêt d'un montage : - dérivateur ; - intégrateur.

NOTIONS ESSENTIELLES

- Amplificateur opérationnel idéal
- Montage dérivateur
- Montage intégrateur
- Condensateur

SITUATION D'APPRENTISSAGE

Un élève de la terminale D découvre dans un manuel, que l'on peut passer d'une tension triangulaire à une tension en créneaux et inversement en associant convenablement un amplificateur opérationnel, un condensateur et un conducteur ohmique. Voulant en savoir davantage, de retour en classe, il partage cette information avec ses camarades. Ensemble, les élèves entreprennent, sous la conduite de leur professeur de Physique-Chimie, de déterminer la relation entre les tensions d'entrée et de sortie d'un montage dérivateur puis d'un montage intégrateur, d'interpréter ces deux montages et de dégager l'intérêt de chacun d'eux.



I- ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1 : RAPPELER LES CARACTÉRISTIQUES D'UN AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL

Observe les images du document 1. Ce sont des amplificateurs opérationnels que tu as eu à étudier en classe de première.

- 1- Rappelle ce qu'est un amplificateur opérationnel et son symbole normalisé.
- 2- Précise à quoi il peut servir.
- 3- Cite ses propriétés lorsqu'il est supposé idéal.



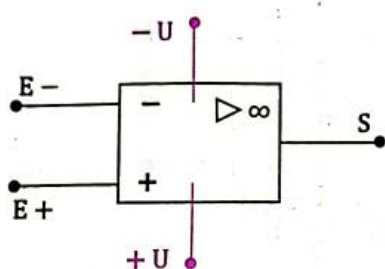
Document 1 : Amplificateurs opérationnels

Je fais le point de l'activité

1- Présentation d'un AO

Un amplificateur opérationnel (A.O.) est un circuit intégré comportant généralement huit bornes aussi appelées pattes qui permettent de le connecter. Il permet d'amplifier les tensions et d'effectuer des opérations mathématiques relatives aux tensions (addition, soustraction, dérivation, intégration...).

Cinq de ses bornes sont représentées sur le symbole ci-dessous.



E^- : Entrée inverseuse

E^+ : Entrée non inverseuse

S : Sortie

$+U$ et $-U$: les bornes d'alimentation symétrique ; les tensions entre ces bornes et la masse sont dites tensions de polarisation ($+9\text{ V}$ et -9 V) ou ($+15\text{ V}$ et -15 V)

Remarque : On ne représente pas les bornes d'alimentation $+U$ et $-U$ sur les schémas.

2- Saturation d'un A.O

La tension de sortie U_s ne peut dépasser en valeur absolue, la tension de polarisation $+V_{cc}$. Lorsqu'elle atteint cette valeur, l'A.O. est dit saturé et la tension U_s est alors égale à la tension de saturation V_{sat} .

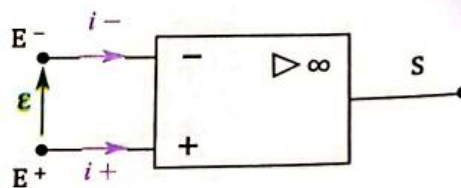
En régime saturé, $U_s = -V_{sat}$ ou $U_s = +V_{sat}$.

NB : la tension de saturation V_{sat} est donnée par le constructeur.

3- Propriétés d'un A.O. idéal en régime linéaire

Les caractéristiques d'un A.O. idéal qui fonctionne en régime linéaire sont :

- $i^- = i^+ = 0$. Aucun courant n'entre pratiquement dans l'A.O.
- L'A.O. présente une résistance infinie à ses bornes d'entrée.
- $\varepsilon = U_{E^+ E^-} = 0$. E^- et E^+ sont au même potentiel.
- $-V_{sat} < U_s < +V_{sat}$





Quelles sont les valeurs des intensités des courants entrant dans un A.O. par les entrées E^+ et E^- en régime linéaire ?

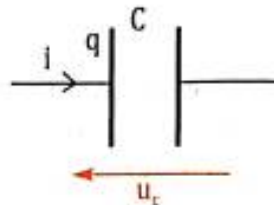
ACTIVITÉ 2 : EFFECTUER DES RAPPELS SUR LE CONDENSATEUR

Observe les dipôles du document 2 a ci-dessous. Ce sont des condensateurs que tu as étudiés en classe de première.

- 1- Rappelle la relation entre la tension u_c aux bornes du condensateur et sa capacité C (document 2b)
- 2- Écris l'expression du courant en fonction de la charge et du temps.



Document 2a : Des condensateurs



Document 2b : Tension aux bornes d'un condensateur

Je fais le point de l'activité

1- Relation entre la charge du condensateur et la tension entre ses bornes

Un condensateur est un ensemble de deux conducteurs en regard qui sont séparés par un isolant.

La relation entre la charge du condensateur et la tension entre ses bornes est : $q = Cu_c$.

La charge q du condensateur s'exprime en coulomb (C), sa capacité C en farad (F), la tension u_c à ses bornes en volt (V) et l'intensité i en ampère (A).

2- Expression de l'intensité du courant

• Courant de charge : $i = \frac{dq}{dt}$

• Courant de décharge : $i = -\frac{dq}{dt}$

Remarque : L'expression $i = \frac{dq}{dt}$ est valable pendant la charge et pendant la décharge.



- 1- Recopie et complète les phrases ci-dessous avec les mots et expressions suivants : capacité, armature A, la dérivée par rapport au temps, proportionnelle à,

Un condensateur est un ensemble de deux conducteurs en regard qui sont séparés par un isolant.

La charge d'un condensateur est la tension à ses bornes. La constante de proportion est appelée du condensateur. L'intensité algébrique du courant arrivant à l'armature A d'un condensateur est égale de la charge portée par cette

- 2- Recopie les lettres qui correspondent aux bonnes réponses.

a) $U_c = C \cdot q$; b) $dq = i \cdot dt$; c) $q = \frac{di}{dt}$; d) $C = q \cdot u_c$; e) $u_c = \frac{q}{C}$; f) $q = \int i \cdot dt$.

ACTIVITÉ 3 : ÉTABLIR LA RELATION ENTRE LA TENSION D'ENTRÉE u_e ET LA TENSION DE SORTIE u_s DANS LE MONTAGE DÉRIVATEUR

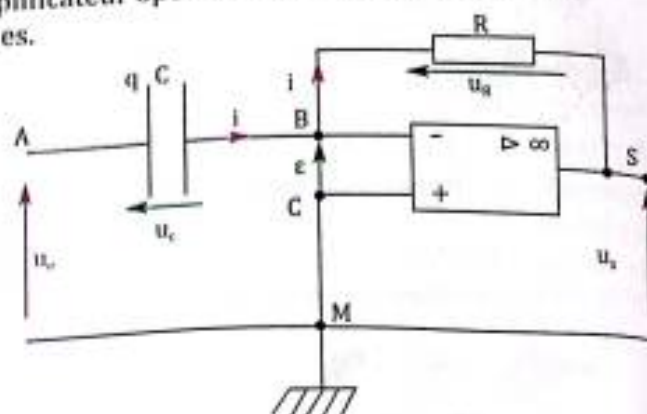
On considère le montage suivant dans lequel l'amplificateur opérationnel est supposé parfait :

1- Montre que $u_e = u_c$ en utilisant la loi des mailles.

2- Dédus-en que $i = C \frac{du_e}{dt}$

3- Montre que $u_s = -Ri$ à partir de la loi des mailles.

4- Dédus la relation entre u_e et u_s .



Document 3 : Schéma pour l'étude théorique d'un montage dérivateur

Je fais le point de l'activité

• Relation entre u_s et u_e

Maille MABCM : $u_{MA} + u_{AB} + u_{BC} + u_{CM} = 0$. On a : $u_{MA} = -u_e$ et $u_{AB} = \frac{q}{C} = u_c$;

$u_{BC} = \varepsilon = 0$ V. Car l'A.O. est parfait. On tire $u_e - u_c = 0 \Rightarrow u_e = \frac{q}{C}$ soit $\frac{du_e}{dt} = \frac{1}{C} \frac{dq}{dt}$

$\frac{du_e}{dt} = \frac{i}{C}$ alors $i = C \frac{du_e}{dt}$ (1)

$i = 0$ A, le condensateur et le conducteur ohmique sont traversés par le même courant.

Dans la maille : MCBMS : $u_{MC} + u_{CS} + u_{BS} + u_{SM} = 0$ soit $0 + 0 + Ri + u_s = 0 \Rightarrow u_s = -Ri$ (2)

En utilisant la relation (1), la relation (2) devient : $u_s = -Ri = -R \left(C \frac{du_e}{dt} \right) = -RC \frac{du_e}{dt}$

Finalement, on obtient $u_s = -RC \frac{du_e}{dt}$.

• Conclusion

La tension de sortie u_s est proportionnelle à la dérivée par rapport au temps de la tension d'entrée u_e . D'où le nom de montage dérivateur.

Remarques :

- Le produit RC est une constante appelée constante de temps. Il s'exprime en seconde (s).
- Le montage dérivateur permet d'obtenir une tension proportionnelle à la dérivée par rapport au temps d'une tension. On peut obtenir par exemple une tension en créneaux à la sortie du montage dérivateur en appliquant à l'entrée une tension en dents de scie.



Exercice 1

Dans un montage dérivateur, on a :

- a) $u_s = -R \frac{du_e}{C \cdot dt}$; c) $u_s = -RC \frac{du_e}{dt}$;
 b) $i = C \frac{du_e}{dt}$; d) $u_s = -C \frac{du_e}{R \cdot dt}$.

Recopie les lettres qui correspondent aux réponses justes.

Exercice 2

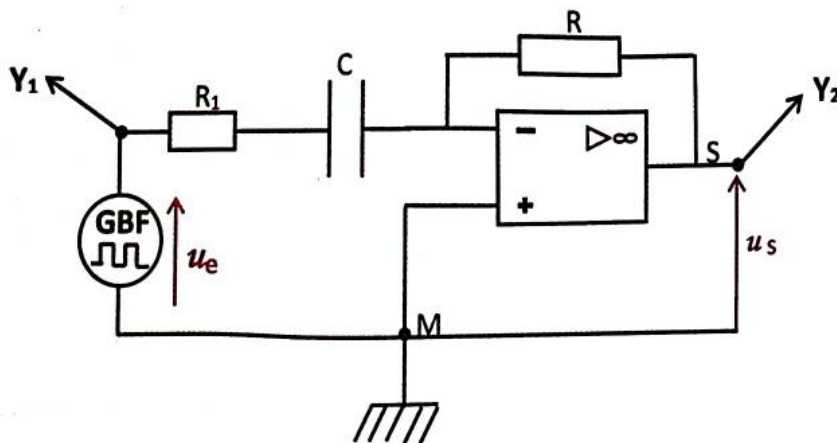
Dans un montage dérivateur on donne : $\frac{du_e}{dt} = -40 \text{ V.s}^{-1}$, $R = 50 \Omega$ et $C = 20 \mu\text{F}$

Détermine la tension de sortie u_s .

ACTIVITÉ 4 : VÉRIFIER EXPÉRIMENTALEMENT LA RELATION ENTRE LA TENSION D'ENTRÉE u_e ET LA TENSION DE SORTIE u_s DANS UN MONTAGE DÉRIVATEUR

1- Réalise le montage schématisé ci-dessous avec :

- un générateur de basses fréquences délivrant une tension en créneaux de fréquence $N = 1000 \text{ Hz}$;
- un condensateur de capacité $C = 0,2 \mu\text{F}$;
- deux conducteurs ohmiques de résistances $R_1 = 50 \Omega$ et $R = 1 \text{ k}\Omega$;
- des fils de connexion.



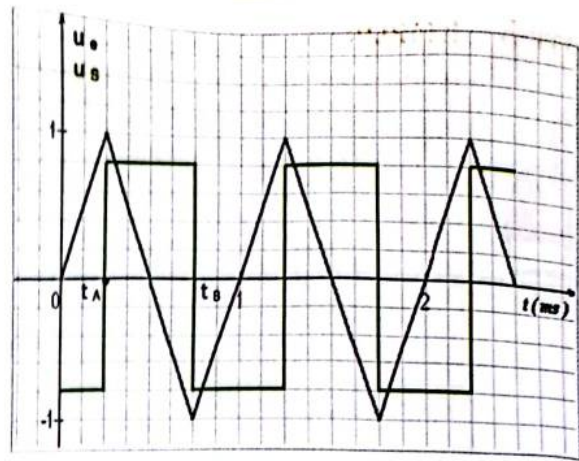
Document 4 : Schéma du circuit pour l'étude expérimentale d'un montage dérivateur

- Fais le branchement de l'oscilloscope au circuit comme indiqué sur le schéma pour visualiser les tensions u_e et u_s .
- Dis à quoi sert le conducteur ohmique de résistance $R_1 = 50 \Omega$.
- Dis ce que représente la dérivée $\frac{du_e}{dt}$ pour la représentation graphique de u_e . Calcule sa valeur pour l'intervalle de temps $[t_A, t_B]$.
- Calcule alors la valeur de u_s à partir de la relation $u_s = -RC \frac{du_e}{dt}$.
- Détermine l'amplitude de la tension u_s correspondant à $[t_A, t_B]$ à partir de l'oscillogramme.
- Compare les deux valeurs de la tension de sortie u_s et conclus.

$$[t_A, t_B] = [0,25 \text{ ms} ; 0,75 \text{ ms}],$$

$$u_s = + 0,8 \text{ V} = \text{cte}$$

Sensibilité verticale : 0,2 V/div



Document 5 : Courbes visualisées

Je fais le point de l'activité

- Rôle du conducteur ohmique R_1 et observations

Le conducteur ohmique de résistance R_1 permet de compenser les défauts de l'amplificateur opérationnel car il n'est pas idéal.

La figure ci-dessus représente ce que l'on observe sur l'écran de l'oscilloscope.

- Vérification de la relation $u_s = -RC \frac{du_e}{dt}$

Sur l'intervalle $[t_A, t_B] = [0,25 \text{ ms} ; 0,75 \text{ ms}]$,

- $u_s = + 0,8 \text{ V} = \text{cte}$
- u_e est une droite de la forme $u_e = at + b$ avec a et b constantes.

$\frac{du_e}{dt} = a$ est le coefficient directeur de la droite ou pente de la droite.

$$a = \frac{\Delta u_e}{\Delta t} = \frac{-1 - 1}{(0,75 - 0,25)10^{-3}} = -4000 \text{ V.s}^{-1}.$$

$$u_s = -RC \frac{du_e}{dt} = -RCa = -(1000).(0,2.10^{-6}).(-4000) = +0,8 \text{ V}$$

Comparaison : la valeur théorique de u_e et la valeur expérimentale sont les mêmes.

La relation $u_s = -RC \frac{du_e}{dt}$ est vérifiée.

Remarques

Le montage dérivateur est utilisé dans les systèmes de régulation pour surveiller le taux de variation de grandeurs physiques telles que la température et la pression.

J'évalue mes acquis



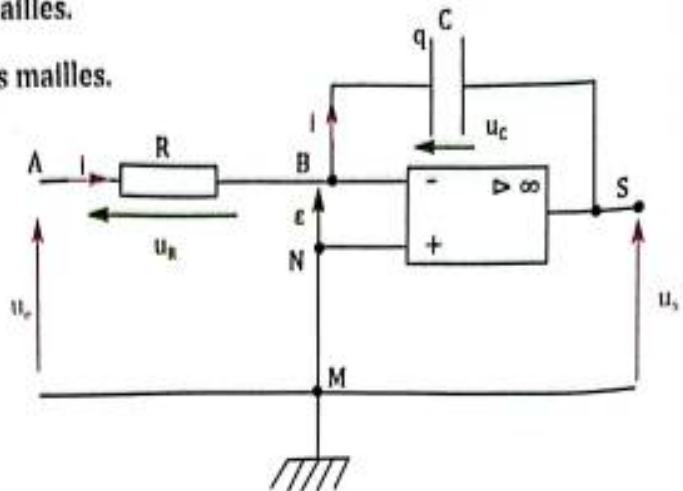
Recopie le numéro de chacune des propositions ci-dessous, suivi de la lettre V si la proposition est vraie ou de la lettre F si elle est fausse.

- 1- Pour réaliser un montage dérivateur, on place le condensateur à l'entrée de l'A.O.
- 2- Lorsqu'on applique une tension en crêteaux à l'entrée d'un montage dérivateur, on obtient à la sortie une tension triangulaire.
- 3- Dans un montage dérivateur tel que $R = 3 \text{ k}\Omega$ et $C = 2 \text{ }\mu\text{F}$, si l'on applique une tension à l'entrée de la tension $u_e(t) = -2000t + 2$ (en unité S.I.) alors la tension de sortie est $u_s(t) = 12 \text{ V}$.
- 4- Un montage dérivateur est tel que $R = 1 \text{ k}\Omega$ et $C = 3 \text{ }\mu\text{F}$ et $+V_{\text{sat}} = 8,5 \text{ V}$. Si l'on applique la tension $u_e(t) = -3000t - 5$ (en unité S.I.) à l'entrée, on obtient à la sortie $u_s(t) = 9 \text{ V}$.

ACTIVITÉ 5 : ÉTABLIR LA RELATION ENTRE LA TENSION D'ENTRÉE u_e ET LA TENSION DE SORTIE u_s DANS LE MONTAGE INTÉGRATEUR

Dans le montage schématisé ci-contre, l'amplificateur opérationnel est supposé idéal.

1. Montre que $u_e = R \cdot i$ en utilisant la loi des mailles.
2. Montre que $i = -C \frac{du_s}{dt}$ à partir de la loi des mailles.
3. Déduis la relation entre u_e et u_s .



Document 6 : Schéma pour l'étude théorique d'un montage intégrateur

Je fais le point de l'activité

- Relation entre u_s et u_e

Dans la maille MABNM : $u_{MA} + u_{AB} + u_{BN} + u_{NM} = 0$ soit : $-u_e + Ri + \varepsilon + 0 = 0 \Rightarrow u_e = Ri$ (1)

Pour la maille MNBSM : $u_{MN} + u_{NB} + u_{BS} + u_{SM} = 0$ soit : $0 - \varepsilon + u_c + u_s = 0 \Rightarrow u_s = -u_c$

Pour le condensateur : $q = C \cdot u_c$ devient : $q = -C u_s$

$$\text{Or } i = \frac{dq}{dt} ; i = -C \frac{du_s}{dt} \quad (2)$$

En utilisant (2), (1) devient : $u_e = Ri = R(-C \frac{du_s}{dt}) = -RC \frac{du_s}{dt}$

Finalement, on obtient : $u_e = -RC \frac{du_s}{dt} ; u_s = -\frac{1}{RC} \int u_e dt$

• Conclusion

La tension de sortie u_s est proportionnelle à une primitive de la tension d'entrée u_e .

Ce montage permet d'obtenir à la sortie, une tension qui est une primitive de la tension d'entrée.

Remarques :

- RC est la constante de temps.
- La tension de sortie u_s est proportionnelle à l'intégrale (ou à la primitive) de la tension d'entrée u_e , d'où le nom de montage intégrateur.

J'évalue mes acquis



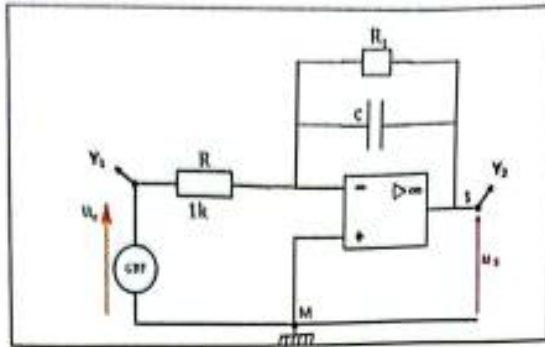
On applique une tension $u_e(t) = U_m \cdot \cos(\omega t + \varphi)$ avec $\omega = 100\pi \text{ rad s}^{-1}$ et $\varphi = \frac{\pi}{2} \text{ rad}$, à l'entrée d'un montage intégrateur. On donne $R = 1 \text{ k}\Omega$ et $C = 5 \mu\text{F}$.

- 1- Fais le schéma du montage.
- 2- Écris une relation entre u_e et u_s pour le montage intégrateur.
- 3- Détermine l'expression de $u_s(t)$.

ACTIVITÉ 6 : VÉRIFIER EXPÉRIMENTALE DE LA RELATION ENTRE LA TENSION D'ENTRÉE u_e ET LA TENSION DE SORTIE u_s D'UN MONTAGE INTÉGRATEUR

1- Réalise le montage schématisé ci-dessous avec :

- un générateur de basses fréquences délivrant une tension triangulaire de fréquence $N = 1000 \text{ Hz}$;
- un condensateur de capacité $C = 0,1 \mu\text{F}$;
- deux conducteurs ohmiques de résistances $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ et $R = 1 \text{ k}\Omega$;
- un oscilloscope bicourbe ;
- des fils de connexion.



Document 7 : Schéma du circuit pour l'étude expérimentale d'un montage intégrateur



Document 8 : Courbes visualisées

$[t_A ; t_B] = [0,25 \text{ ms} ; 0,75 \text{ ms}]$;

Sensibilité verticale : $0,2 \text{ V/div}$

- Fais le branchement de l'oscilloscope au circuit comme indiqué sur le schéma pour visualiser les tensions u_e et u_s .
- Détermine, à partir des oscillogrammes, pour l'intervalle de temps $[t_A, t_B]$:
 - la tension d'entrée u_e ;
 - le coefficient directeur $a = \frac{du_s}{dt}$ de la tension de sortie ;
 - u_e à partir de la relation $u_e = -RC \frac{du_s}{dt}$.
- Compare les résultats des consignes 3.1 et 3.2 et conclus.

Je fais le point de l'activité

Sur l'intervalle $[t_A ; t_B] = [0,25 \text{ ms} ; 0,75 \text{ ms}]$,

- $u_e = 2 \times 0,2 \text{ V/div}$ soit $u_e = +0,4 \text{ V} = \text{cte}$
- u_s est une droite de la forme $u_s = at + b$ avec a et b constantes $\Rightarrow \frac{du_s}{dt} = a$
 a est la pente de la droite : $a = \frac{\Delta u_s}{\Delta t} = \frac{-1 - 1}{(0,75 - 0,25)10^{-3}} = -4000 \text{ V.s}^{-1}$
- $u_e = -RC \frac{du_s}{dt} = -RCa = -1000.(0,1.10^{-6})(-4000) = +0,4 \text{ V}$.

Les deux valeurs de u_e sont identiques. La relation $u_e = -RC \frac{du_s}{dt}$ ou $u_s = -\frac{1}{RC} \int u_e dt$ est vérifiée.



Recopie le numéro de chacune des affirmations ci-dessous, suivi de la lettre V si l'affirmation est vraie ou de la lettre F si elle est fausse.

- 1- Pour réaliser un montage intégrateur, on place le condensateur à l'entrée de l'A.O.
- 2- Lorsqu'on applique une tension triangulaire à l'entrée d'un montage dérivateur, on obtient à la sortie une tension en créneaux.
- 3- Lorsqu'on applique une tension en sinusoïdale à l'entrée d'un montage intégrateur, on obtient à la sortie une tension en cosinusoidale.
- 4- Dans un montage intégrateur tel que $RC = 1 \text{ s}$, si l'on applique la tension $u_e(t) = 0,8 \cos t$ (en unité S.I.) à l'entrée, alors la tension de sortie est $u_s(t) = -0,8 \sin t$ (en unité S.I.).

II- RÉSUMÉ DE COURS

• Propriétés d'un amplificateur opérationnel (A.O.) idéal :

Un amplificateur opérationnel idéal ou parfait qui fonctionne en régime linéaire possède les deux caractéristiques suivantes :

- aucun courant n'entre dans l'amplificateur opérationnel. $i^+ = i^- = 0 \text{ A}$;
- la tension entre les deux entrées est nulle $\varepsilon = U_{E^+E^-} = 0 \text{ V}$.

• Le condensateur

Un condensateur est un ensemble de deux conducteurs en regard séparés par un isolant.

La charge q du condensateur et la tension u_c entre ses bornes sont liées par la relation : $q = Cu_c$
 C est la capacité du condensateur. Elle s'exprime en farad (F).

L'expression du courant de charge et de décharge du conducteur est : $i = \frac{dq}{dt}$.

• Montage dérivateur

La tension de sortie u_s d'un montage dérivateur est proportionnelle à la dérivée par rapport au temps de la tension d'entrée u_e .

$$u_s = -RC \frac{du_e}{dt}$$

Un montage dérivateur permet d'obtenir à la sortie une tension proportionnelle à la dérivée par rapport au temps d'une tension d'entrée.

• Montage intégrateur

Dans un montage intégrateur, la tension de sortie u_s est proportionnelle à une primitive de la tension d'entrée u_e . D'où le nom de montage intégrateur.

$$u_s = -RC \frac{du_e}{dt} \text{ soit } u_s = -\frac{1}{RC} \int u_e dt$$

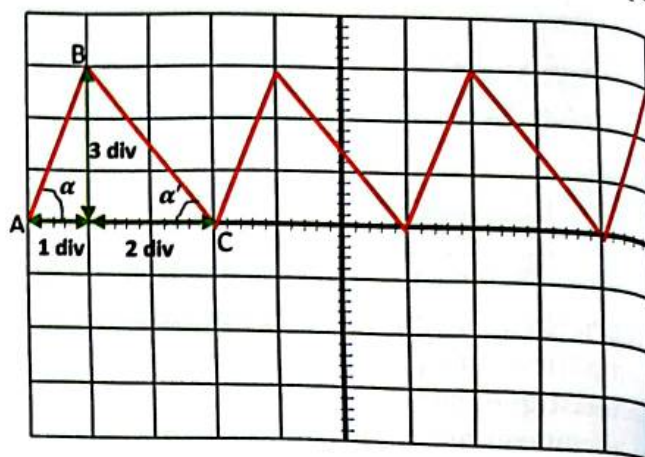
III- MÉTHODES

Détermination de la dérivée d'une tension en dents de scie

L'oscillogramme de la figure 1 donne la représentation graphique d'une tension triangulaire $u(t)$, délivrée par un générateur de basses fréquences (GBF). On branche le GBF à un oscilloscope afin de visualiser la tension qu'il délivre. Les réglages de l'oscilloscope sont les suivants : sensibilité horizontale : 5 ms/div et sensibilité verticale : 2 V/div.

Une tension triangulaire est une fonction affine par intervalle. Sur chaque intervalle, le coefficient directeur de la portion de droite représentant $u(t)$ est égal à la dérivée de $u(t)$ par rapport au temps.

$$a = \frac{du}{dt} = \frac{\Delta u}{\Delta t}$$



Nous pouvons utiliser deux méthodes.

Première méthode		
Intervalle considéré	$t \in [0 ; 5 \text{ ms}]$, portion [AB].	$t \in [5 ; 15 \text{ ms}]$, portion [BC].
Sens de variation	La tension est croissante, sa dérivée est positive.	La tension est décroissante, sa dérivée est négative.
Formule	$a_1 = \frac{u_B - u_A}{t_B - t_A}$	$a_2 = \frac{u_C - u_B}{t_C - t_B}$
Calcul	$a_1 = \frac{3 \times 2 - 0 \times 2}{(1 \times 5 - 0) \cdot 10^{-3}}$	$a_2 = \frac{0 \times 2 - 3 \times 2}{3 \times 5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}}$
Résultats	$a_1 = 1200 \text{ V.s}^{-1}$	$a_2 = -600 \text{ V.s}^{-1}$

Deuxième méthode		
Dans la deuxième méthode on a $a = \pm \frac{\text{Nombre de division compté verticalement} \times \text{sensibilité verticale}}{\text{nombre de division compté horizontalement} \times \text{sensibilité horizontale}}$		
Intervalle considéré	$t \in [0 ; 5 \text{ ms}]$, portion [AB].	$t \in [5 ; 15 \text{ ms}]$, portion [BC].
Sens de variation	La tension est croissante sa dérivée est positive	La tension est décroissante sa dérivée est négative.
Formule	$a_1 = \frac{\text{Nbre de division verticale} \times \text{sensibilité vert.}}{\text{nbre de division horizontale} \times \text{sens. horizontale}}$ $a_1 = \tan \alpha = \frac{\text{côté opposé}}{\text{côté adjacent}}$	$a_2 = \frac{\text{Nbre de division verticale} \times \text{sensibilité vert.}}{\text{nbre de division horizontale} \times \text{sens. horizontale}}$ $a_2 = \tan \alpha' = \frac{\text{côté opposé}}{\text{côté adjacent}}$
Calcul	$a_1 = \frac{3 \times 2}{1 \times 5 \cdot 10^{-3}}$	$a_2 = \frac{-3 \times 2}{5 \cdot (3 - 1) \cdot 10^{-3}}$
Résultats	$a_1 = +1200 \text{ V.s}^{-1}$	$a_2 = -600 \text{ V.s}^{-1}$

IV- EXERCICES RÉSOLUS

Exercice 1

Reproduis puis relie par des flèches chaque montage du diagramme A à l'expression qui lui correspond dans le diagramme B.

MONTAGE DÉRIVATEUR •

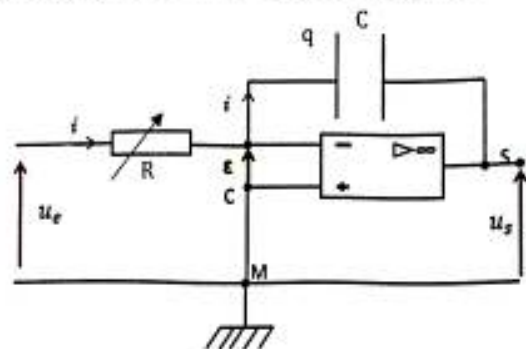
MONTAGE INTÉGRATEUR •

$$\begin{aligned} & \bullet u_e = -\frac{1}{RC} \frac{du_s}{dt} \\ & \bullet \frac{du_s}{dt} = -\frac{1}{RC} u_e \\ & \bullet \frac{du_s}{dt} = -RC u_e \\ & \bullet u_s = -RC \frac{du_e}{dt} \\ & \bullet \frac{du_e}{dt} = -RC \frac{du_s}{dt} \end{aligned}$$

Exercice 2

On applique à l'entrée du montage dont le schéma est représenté ci-dessous, une tension d'entrée $u_e(t)$ qui est une tension en crêteaux symétrique, d'amplitude $U_m = 3 \text{ V}$ et de période $T = 2 \text{ ms}$. L'amplificateur opérationnel fonctionne en régime linéaire et il est idéal. La tension de sortie a pour amplitude $u_{s\text{max}} = 8 \text{ V}$. On donne $C = 50 \text{ nF}$ et le conducteur ohmique est de résistance variable. La tension de saturation de l'A.O est $V_{\text{sat}} = +12 \text{ V}$.

- 1- Nomme le montage.
- 2- Représente la tension d'entrée sur deux périodes.
- 3- Détermine la valeur de la résistance R du conducteur ohmique :
 - 3.1- pour la tension de sortie d'amplitude U_{sm} ;
 - 3.2- pour que l'A.O sature.



Exercice 3

On réalise le montage schématisé sur la figure 1. L'A.O est parfait et fonctionne en régime linéaire. $V_{\text{sat}} = \pm 13 \text{ V}$. On donne $R = 10^4 \Omega$ et $C = 20 \mu\text{F}$. La tension d'entrée est représentée sur la figure 2.

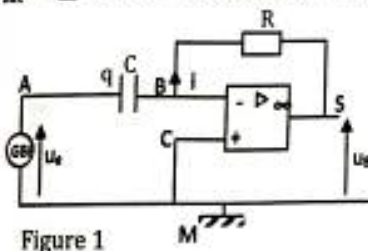


Figure 1

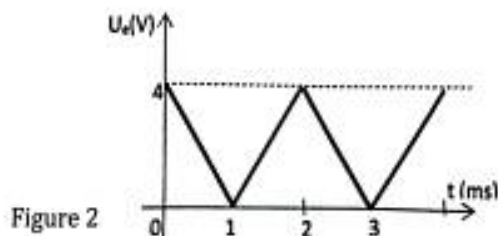
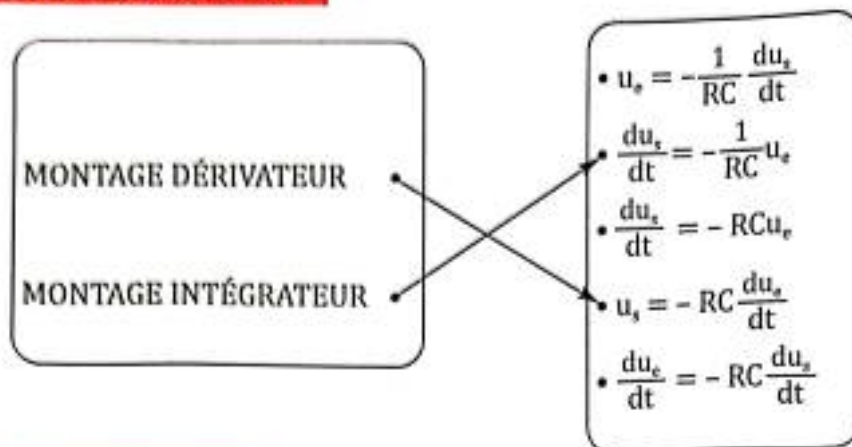


Figure 2

- 1- Donne :
 - 1.1- les caractéristiques d'un amplificateur opérationnel idéal ;
 - 1.2- la relation entre u_e et u_s .
- 2- Détermine la fréquence N de la tension d'entrée u_e .
- 3- Établis, pour $0 < t < 1 \text{ ms}$, l'expression littérale de $u_s = f(t)$ en fonction de U_{max} et de la période T .
- 4- Écris l'expression numérique de $u_s(t)$.

Résolution de l'exercice 1

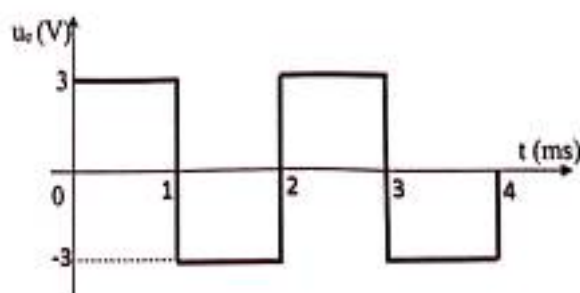


Commentaire :

Mémoriser la relation entre la tension d'entrée et la tension de sortie pour chaque type de montage.

Résolution de l'exercice 2

- 1- C'est un montage intégrateur
- 2- Représentation de $u_e(t)$



3-

3.1- Dans le montage intégrateur, on a $u_s = -RC \frac{du_e}{dt}$ soit $\frac{du_s}{dt} = -\frac{1}{RC} u_e$
 soit $u_s = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_e dt = [u_e t + b]_0^t$; on tire $u_s = -\frac{Tu_e}{2RC}$ donc $R = -\frac{u_e T}{2Cu_s}$
 A.N : Avec $u_e = 3 \text{ V}$; $u_s = -8 \text{ V}$; $R = -\frac{3 \times 2 \cdot 10^{-3}}{2 \times 50 \cdot 10^{-9} \times (-8)}$ $R = 7500 \Omega$.
 $u_e = 3 \text{ V}$, $u_s = -8 \text{ V}$, u_e et u_s sont des signes opposés.

3.1- Pour que l'A.O sature il faut que l'on ait : $u_s = V_{sat} = -12 \text{ V}$

$$R = -\frac{u_e T}{2C \cdot V_{sat}} = \frac{-3 \times 2 \cdot 10^{-3}}{2 \times 50 \cdot 10^{-9} \times (-12)} ; R = 5000 \Omega$$

Commentaire :

Il faut être capable de reconnaître le schéma d'un montage intégrateur. En effet, dans ce montage, le conducteur ohmique est disposé du côté de l'entrée tandis que le condensateur est branché entre l'entrée inverseuse et la sortie de l'A.O. Il est aussi nécessaire de connaître l'expression de la tension de sortie et savoir que $U_s = V_{sat}$ au moment de la saturation de l'A.O.

1.1- Les caractéristiques d'un A.O. idéal qui fonctionne en régime linéaire sont :

$$i = i' = 0 \text{ A} ; \quad \text{et } \varepsilon = U_d = U_{F+E} = 0 \text{ V}$$

1.2 Relation entre u_e et u_s

$$u_s = -RC \frac{du_e}{dt}$$

2. Fréquence

$$N = \frac{1}{T} = \frac{1}{2 \cdot 10^{-3}} \quad N = 500 \text{ Hz}$$

3. Établissons, pour $0 < t < 1 \text{ ms}$, l'expression littérale de $u_s = f(t)$ en fonction de $U_{\max}$ et de la période T , puis de la fréquence N .

$$u_s(t) = at + b \text{ avec } a = \frac{du_s}{dt} = \frac{\Delta u_s}{\Delta t} = \frac{0 - U_{\max}}{\frac{T}{2} - 0} = -\frac{2U_{\max}}{T} \text{ donc } u_s(t) = -\frac{2U_{\max}}{T}t + b$$

$$\text{À } t = 0, u_s = U_{\max} \text{ soit } U_{\max} = -\frac{2U_{\max}}{T} \times 0 + b. \text{ Donc } b = U_{\max}. \quad U_s(t) = -\frac{2U_{\max}}{T}t + U_{\max}$$

$$\text{Donc } u_s(t) = U_{\max} \left(-\frac{2}{T}t + 1 \right).$$

$$4. \text{ Expression numérique : } u_s = 4 \left(-\frac{2}{2 \cdot 10^{-3}}t + 1 \right) = -4 \cdot 10^3 t + 4.$$

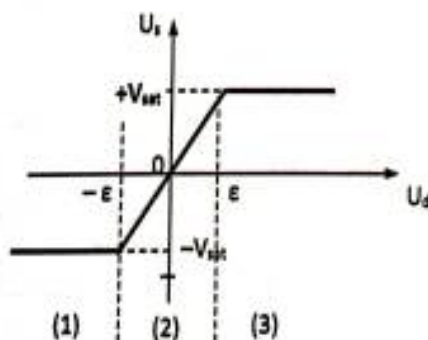
Commentaire :

Il faut maîtriser parfaitement la leçon, en particulier les caractéristiques d'un A.O idéal et la relation entre la tension d'entrée et la tension de sortie. Connaître la dérivée des fonctions en mathématiques ; il s'agit ici d'une fonction affine.

V- JE M'EXERCE

Exercices de fixation / Application

1. On donne la caractéristique de transfert suivante pour un amplificateur opérationnel :



Caractéristique d'un amplificateur opérationnel réel

1- Recopie et complète les phrases suivantes en précisant le régime correspondant à chaque zone.

La zone (1) correspond au régime.....

La zone (2) correspond au régime.....

La zone (3) correspond au régime.....

2- Donne la caractéristique d'un A.O. idéal.

2. Arrange les mots, expressions et relations qui suivent de manière obtenir une phrase qui possède un sens.

1- tension triangulaire, / et de sortie sont liées / une tension en créneaux / par la relation / dérivateur qui / $u_s = -RC \frac{du_e}{dt}$.

/ Dans un montage / les tensions d'entrée / permet d'obtenir / à partir d'une

2- une primitive de / l'entrée inverseuse. / une tension proportionnelle à / Un montage intégrateur / électronique à la sortie / est un montage / la tension appliquée à / qui permet d'obtenir

3 Recopie, pour chacune des affirmations ci-dessous, le numéro suivi de la lettre V si l'affirmation est vraie ou de la lettre F si elle est fausse.

- 1- Pour réaliser un montage intégrateur, on place le condensateur entre l'entrée inverseuse et la sortie.
- 2- Dans les montages intégrateur et dérivateur les tensions d'entrée et de sortie possèdent la même période.
- 3- Dans un montage dérivateur les tensions d'entrée u_e et de sortie u_s sont liées par la relation : $u_e = -RC \frac{du_s}{dt}$.
- 4- Dans un montage intégrateur de constante de temps $RC = 1$ s, la tension d'entrée est égale à l'opposé de la dérivée par rapport au temps de la tension de sortie.
- 5- Dans un montage intégrateur les tensions

d'entrée u_e et de sortie u_s sont liées par la relation : $u_e = -RC \frac{du_s}{dt}$.

4 On considère le montage dérivateur.

- 1- Fais le schéma du montage théorique.
- 2- Établis la relation entre la tension d'entrée u_e et la tension de sortie u_s .
- 3- Justifie le nom du montage.
- 4- Dégage l'intérêt d'un tel montage.

5 On considère le montage intégrateur.

- 1- Fais le schéma du montage théorique.
- 2- Établis la relation entre la tension d'entrée u_e et la tension de sortie u_s .
- 3- Justifie le nom du montage.
- 4- Dégage l'intérêt d'un tel montage.

Exercices de renforcement / Approfondissement

6 On considère le circuit schématisé ci-dessous. L'amplificateur opérationnel est supposé parfait. On visualise le signal à la sortie (u_s) du circuit sur la voie B d'un oscilloscope bicourbe. (Figure 2)

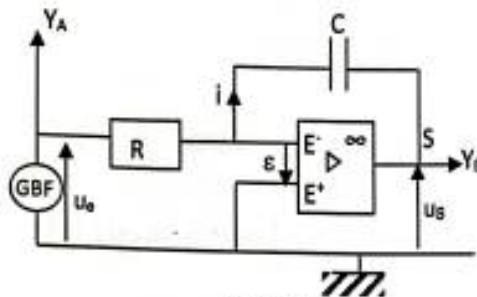


Figure 1

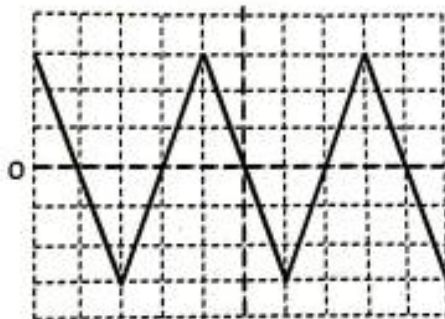


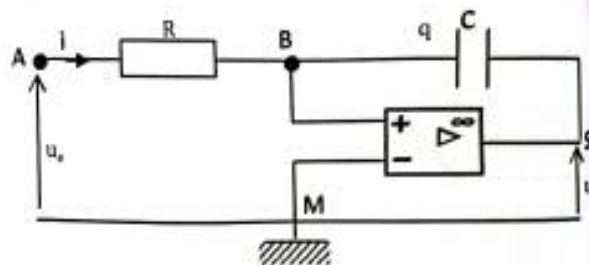
Figure 2

Données : $R = 10 \text{ k}\Omega$, $C = 0,1 \text{ }\mu\text{F}$, sensibilité horizontale $s_h = 0,5 \text{ ms/div}$, sensibilité verticale sur la voie A est $S_{vA} = 5 \text{ V/div}$ et la sensibilité verticale sur la voie B est $s_{vB} = 2 \text{ V/div}$.

1- Donne le nom de ce montage.

- 2- Établis la relation entre la tension d'entrée u_e et la tension de sortie u_s .
- 3- Détermine à partir de la figure 2, l'amplitude et la période de la tension de sortie u_s .
- 4- Représente graphiquement le signal u_e délivrée par le GBF à l'entrée du circuit que l'on observe sur la voie A.

7 Dans le montage suivant, la tension appliquée à l'entrée est une tension en créneau de fréquence $N = 200 \text{ Hz}$ et d'amplitude $U = 3 \text{ V}$. L'A.O est supposé idéal.



Données : $C = 0,1 \text{ }\mu\text{F}$; $R = 10 \text{ k}\Omega$.

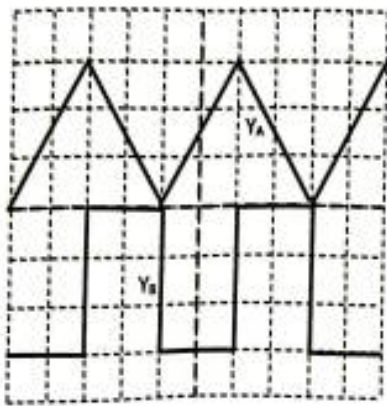
1.

1.1- Donne le nom de ce montage.

1.2. Représente, sur une feuille de papier millimétré, les variations de la tension d'entrée u_e .

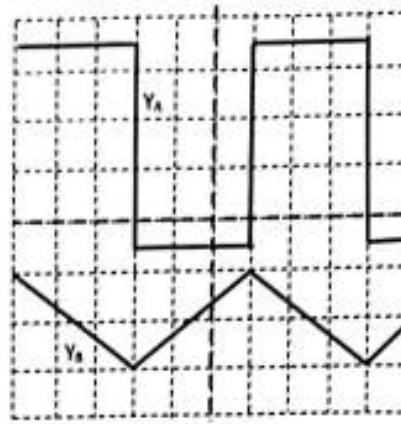
- 2- Établis la relation $u_s = -\frac{1}{RC} \int u_e dt$.
- 3- Détermine l'expression de la tension de sortie pour $t \in [0; \frac{T}{2}]$.
- 4- Calcule u_s pour $t = \frac{T}{4}$.

8 On applique à l'entrée d'un montage une tension $u_e(t)$ et l'on recueille, en sortie, une tension $u_s(t)$. On visualise sur la voie A d'un oscilloscope bicourbe la tension $u_e(t)$. L'oscilloscope bicourbe est réglé de manière suivante : base des temps : 5 ms / div et sensibilité verticale sur la voie A est $S_{vA} = 0,2 \text{ V} \cdot \text{div}^{-1}$ et sur la voie B, $S_{vB} = 10 \text{ mV} \cdot \text{div}^{-1}$, $C = 200 \mu\text{F}$.



- 1- Dis s'il s'agit d'un montage dérivateur ou intégrateur.
- 2- Détermine à partir des oscillogrammes u_e et $\frac{du_e}{dt}$ pour $t \in [0; \frac{T}{2}]$.
- 3- Déduis :
 - 3.1- la constante de temps τ ;
 - 3.2- la valeur de la résistance R du circuit.

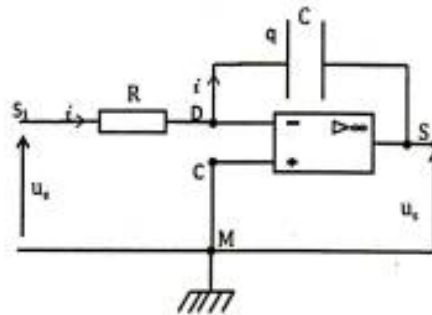
9 On applique à l'entrée d'un montage une tension $u_e(t)$ et l'on recueille, en sortie, une tension $u_s(t)$. Les deux tensions sont visualisées sur un oscillographe bicourbe réglé de manière suivante : base des temps : 5 ms / div. La sensibilité verticale sur la voie A est $s_{vA} = 0,2 \text{ V} \cdot \text{div}^{-1}$ et celle sur la voie B est $s_{vB} = 10 \text{ mV} \cdot \text{div}^{-1}$. La tension d'entrée est visualisée sur la voie A et celle de sortie sur la voie B.



Donnée : $R = 20 \text{ k}\Omega$

- 1-
 - 1.1- Précise l'intérêt du montage dérivateur, et celui du montage intégrateur.
 - 1.2- Dis s'il s'agit d'un montage dérivateur ou intégrateur.
- 2- Détermine à partir des oscillogrammes u_e et $\frac{du_e}{dt}$ pour $t \in [0; \frac{T}{2}]$.
- 3- Déduis :
 - 3.1- la constante de temps τ ;
 - 3.2- la valeur de la capacité C du condensateur.

10 On considère le montage représenté sur la figure. Dans ce montage l'amplificateur opérationnel est supposé idéal et fonctionne en régime linéaire. L'intensité du courant est $i = 2 \text{ mA}$.



Données : $R = 4 \text{ k}\Omega$ et $C = 5 \mu\text{F}$.

- 1- Nomme ce montage.
- 2- Détermine la tension aux bornes du conducteur ohmique.
- 3- Calcule la dérivée par rapport au temps de la tension de sortie $\frac{du_s}{dt}$.
- 4- Déduis la tension d'entrée u_e .

Situations d'évaluation

11 Lors d'un concours organisé par le conseil d'enseignement de Physique-Chimie de ton établissement, les candidats sont invités à déterminer et à représenter la tension de sortie dans le montage schématisé sur la figure 1. L'A.O. est parfait et fonctionne en régime linéaire. Sa tension de saturation est $V_{sat} = \pm 13$ V. Pour que le fonctionnement de l'A.O. reste linéaire, la fréquence N doit être inférieure à une valeur N_0 .

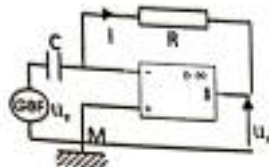


Figure 1

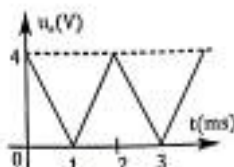


Figure 2

Données : $R = 10^4 \Omega$ et $C = 20 \mu F$.
La tension d'entrée est représentée sur la figure 2.
Tu es candidat(e).

- 1- Établis la relation entre u_e et u_s .
- 2- Détermine :
 - 2.1- la fréquence N de la tension d'entrée u_e ;
 - 2.2- l'expression de $u_s = f(t)$ en fonction de U_{max} , de N pour $0 < t < 1$ ms ;
 - 2.3- l'expression littérale de la tension u_s en fonction de R , C , U_{max} et N ;
 - 2.4- l'expression littérale de la fréquence N_0 en fonction de V_{sat} , R , C et U_{max} .
- 3- Représente dans un même repère les graphes de $u_e = f(t)$ et de $u_s = g(t)$.

12 Au cours d'une séance de préparation d'une évaluation, le professeur vous demande de déterminer l'expression de la tension de sortie du montage ci-dessous.

Dans ce montage, on applique une tension triangulaire positive $u_e(t)$ de fréquence $N = 500$ Hz. L'A.O. fonctionne en régime linéaire et sature à $U_{sat} = 13$ V ou -13 V.

Cas 1 : Lorsque le GBF délivre le signal (1), on observe à la sortie le signal de la figure (2).

Cas 2 : Lorsque le GBF délivre le signal (2), on observe à la sortie le signal de la figure (3).

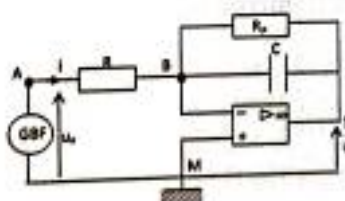


Figure 1

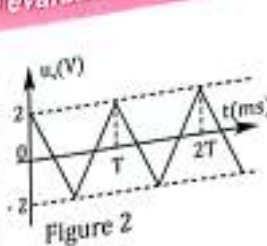


Figure 2

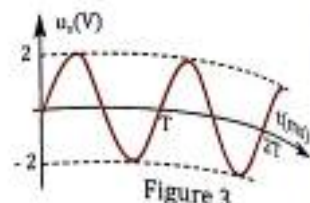


Figure 3

Données : $R = 10$ k Ω , $C = 0,2 \mu F$ et la période $T = 2$ ms. L'expression littérale de la tension d'entrée est $u_e(t) = U_m \sin(\omega t)$.

- 1- Nomme ce montage.
- 2- Établis l'expression de la tension de sortie u_s en fonction de u_e , R et C .
- 3- Détermine :
 - 3.1- l'expression de la tension $u_s(t)$ pour une période lorsque le GBF délivre le signal de la figure 2 ;
 - 3.2- les valeurs de U_m et ω à partir de la courbe de la figure 3 ;
 - 3.3- l'expression numérique de la tension $u_s(t)$ et $u_e(t)$.
- 4- Représente la tension d'entrée u_e :
 - 4.1- lorsque la tension de sortie est représentée par la courbe de la figure 2 ;
 - 4.2- lorsque la tension de sortie est représentée par la courbe de la figure 3.

13 Après le cours sur les montages dérivateur et intégrateur, ton professeur désire tester tes connaissances. Il te propose d'étudier un montage dérivateur à l'entrée duquel on applique une tension alternative et sinusoïdale dont l'expression est : $u_e(t) = 4 \sin(500\pi t)$. Le temps t est en seconde (s) et la tension u_e est en volt (V).

Le tableau des valeurs ci-dessous donne les mesures de la tension $u_s(t)$.

t(ms)	0	0,5	0,8	1	1,2	1,5	1,8	2
$u_e(V)$	0	2,83	3,80	4	3,80	2,83	1,24	0
$u_s(V)$								

t(ms)	2,2	2,5	2,8	3	3,2	3,5	3,8	4
$u_e(V)$	-1,24	-2,83	-3,80	-4	-3,80	-2,83	-1,24	0
$u_s(V)$								

Données : $R = 30$ k Ω ; $C = 50$ nF.

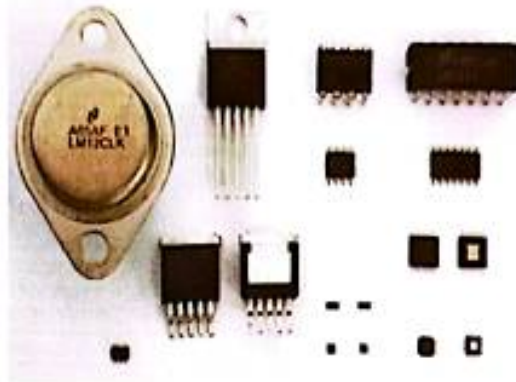
Échelles : Abscisse : 5 cm $\longleftrightarrow$ 1 ms ;

Ordonnée : 1 cm $\longleftrightarrow$ 1 V.

1. Fais le schéma du montage théorique.
2. Écris la relation entre la tension u_e et la tension de sortie u_s .
3. Donne l'expression de $u_s(t)$ puis complète la dernière ligne du tableau.

4. Représente les variations de la tension d'entrée u_e et de la tension de sortie u_s en fonction du temps dans un même repère.

VI- RENDEZ-VOUS DES CURIEUX



Un **amplificateur opérationnel** (aussi dénommé ampli-op ou ampli op, AO, AOP, ALI ou AIL) est un amplificateur différentiel : c'est un amplificateur électronique qui amplifie une différence de potentiel électrique présente à ses entrées. Il a été initialement conçu pour effectuer des opérations mathématiques dans les calculateurs analogiques : il permettait de modéliser les opérations mathématiques de base comme l'addition, la soustraction, l'intégration, la dérivation et d'autres. Par la suite, l'amplificateur opérationnel est utilisé dans bien d'autres applications comme la commande de moteurs, la régulation de tension, les sources de courants ou encore les oscillateurs.

Physiquement, un amplificateur opérationnel est constitué de transistors, de tubes électroniques ou de n'importe quels autres composants amplificateurs. On le trouve communément sous la forme de circuit intégré.

Le gain en tension très important d'un amplificateur opérationnel en boucle ouverte fait de lui un composant utilisé dans une grande variété d'applications. Certains amplificateurs opérationnels, de par leurs caractéristiques (temps de montée, faible distorsion harmonique, etc.), sont spécialisés dans l'amplification de certains types de signaux comme les signaux audio ou vidéo.

On doit le terme d'amplificateur opérationnel (*Operational Amplifier* en anglais) à John R. Ragazzini en 1947. Les amplificateurs opérationnels ont été initialement développés à l'ère des tubes électroniques, ils étaient alors utilisés dans les calculateurs analogiques. Actuellement, les amplificateurs opérationnels sont disponibles sous forme de circuits intégrés, bien que des versions sous forme de composants discrets soient utilisées pour des applications spécifiques.

LEÇON 10

OSCILLATIONS ÉLECTRIQUES LIBRES DANS UN CIRCUIT LC

TABLEAU DES HABILETÉS ET DES CONTENUS

HABILETÉS	CONTENUS
Définir	un oscillateur électrique.
Interpréter	la charge et la décharge d'un condensateur.
Établir	l'équation différentielle d'un oscillateur électrique LC.
Connaître	une solution de l'équation différentielle.
Connaître	les caractéristiques des oscillations d'un oscillateur électrique LC : - la pulsation propre ; - la période propre ; - la fréquence propre ; - l'amplitude ; - la phase à l'origine des dates.
Utiliser	- la pulsation propre ; - la période propre ; - la fréquence propre ; - l'amplitude ; - la phase à l'origine des dates.
Déterminer	l'énergie emmagasinée dans un circuit LC.
Montrer	la conservation de l'énergie totale du circuit LC.
Établir	l'analogie oscillateur mécanique-oscillateur électrique.
Expliquer	l'influence de la résistance interne de la bobine sur les oscillations électriques.
Analyse	un montage à "résistance négative".
Expliquer	l'entretien des oscillations avec un circuit intégré linéaire.

NOTIONS ESSENTIELLES

- Oscillations électriques libres
- Pulsation, période et fréquence propres
- Oscillations pseudopériodiques
- Pseudopériode
- Oscillations apériodiques
- Résistance négative
- Entretien des oscillations

SITUATION D'APPRENTISSAGE

Lors de ses recherches, un élève de la terminale D et président du club de Physique-Chimie de son établissement, découvre que le circuit électrique (L, C) constitué d'une bobine d'inductance L, de résistance interne r négligeable et d'un condensateur de capacité C, est le siège des oscillations électriques sinusoïdales.

De retour en classe, il partage cette information avec ses camarades de classe. Pour en savoir plus, sous la supervision de leur professeur, les élèves cherchent à définir un oscillateur électrique, à déterminer l'équation différentielle d'un oscillateur électrique LC et à établir l'analogie oscillateur mécanique-oscillateur électrique.



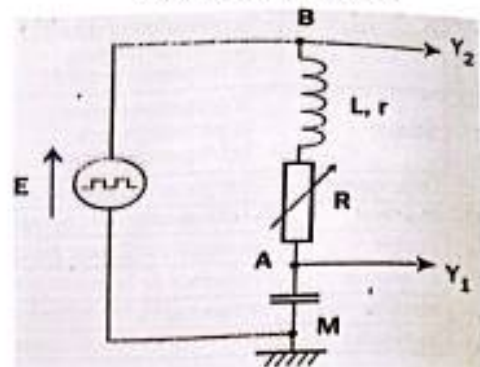
I- ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1 : VISUALISER DES OSCILLATIONS ÉLECTRIQUES DANS UN CIRCUIT LC

- 1- Réalise le montage constitué d'une bobine d'inductance L , de résistance interne r supposée négligeable, d'une résistance variable R et d'un condensateur de capacité C tous montés en série. Un générateur délivre aux bornes de l'ensemble, une tension en créneaux évoluant entre 0 et E (en volts).
- 2- Visualise sur la voie Y_2 d'un oscilloscope, la tension aux bornes de l'ensemble des dipôles en série.
- 3- Visualise sur la voie Y_1 , la tension aux bornes du condensateur.
- 4- Représente les oscillogrammes pour $R = 0 \Omega$.
- 5- Conclue.



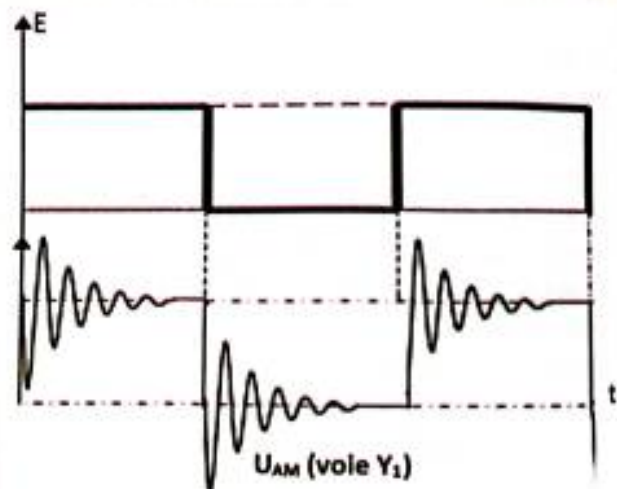
Document 1 : Montage pour la visualisation des oscillations électriques



Document 2 : Schéma du montage pour la visualisation des oscillations électriques

Je fais le point de l'activité

- Sur la voie Y_2 , nous avons la tension $u_{BM} = u$.
- Sur la voie Y_1 , nous avons la tension $u_{AM} = u_c$.
- De 0 à $\frac{T}{2}$, la tension aux bornes du circuit est constante et égale à E . Le condensateur se charge ; la tension entre ses bornes oscille autour de la valeur E avec diminution des amplitudes.
- De $\frac{T}{2}$ à T , la tension u_{BM} aux bornes du circuit est égale à zéro. Le condensateur se décharge ; la tension u_{AM} entre ses bornes s'annule après quelques oscillations, avec une diminution des amplitudes autour de 0.
- En conclusion, le circuit LC est le siège des oscillations amorties.



J'évalue mes acquis



Un condensateur, initialement chargé, se décharge dans une bobine. On observe la tension u_c aux bornes du condensateur à l'aide d'un oscillogramme (voir figure ci-dessous).



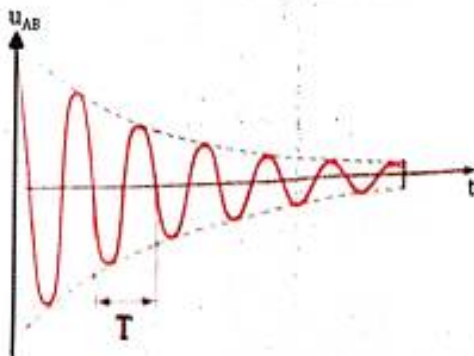
Décris la courbe de variations de la tension u_c aux bornes du condensateur.

ACTIVITÉ 2 : MONTRER L'INFLUENCE DE LA RÉSISTANCE R SUR LES OSCILLATIONS

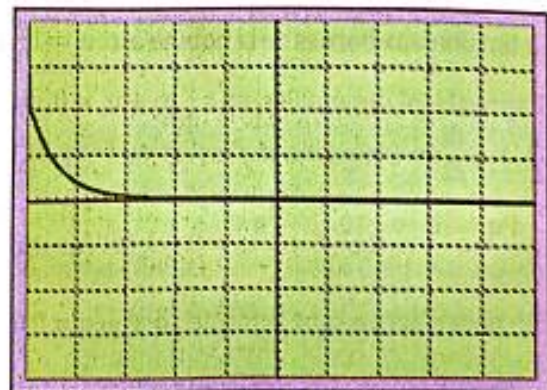
- 1- Observe l'allure des oscillations de l'expérience de l'activité 1 en faisant varier la résistance R du conducteur ohmique.
- 2- Note tes observations.
- 3- Conclue.

Je fais le point de l'activité

- Lorsque la résistance du conducteur ohmique est faible, les oscillations sont sinusoïdales mais les amplitudes diminuent au cours du temps. Il s'agit des oscillations pseudo-périodiques de période T appelée pseudo-période.
- Lorsque la résistance R est grande, l'amortissement des oscillations devient important. Au-delà d'une certaine valeur de R , il n'y a plus d'oscillations. Il s'agit de régime aperiodique.



Décharge oscillante amortie
Régime pseudo-périodique T voisin de T_0



la décharge est aperiodique.

- En conclusion, la résistance R du conducteur ohmique est à l'origine de la diminution des amplitudes des oscillations.

J'évalue mes acquis



- 1- Compare les amortissements des oscillations dans les circuits suivants :
 - a) circuit 1 : circuit LC ;
 - b) circuit 2 : obtenu à partir du circuit 1 en insérant un conducteur ohmique en série avec une bobine inductive et un condensateur.

ACTIVITÉ 3 : ÉTABLIR L'ÉQUATION DIFFÉRENTIELLE D'UN CIRCUIT LC

Un condensateur de capacité C , préalablement chargé, de charge Q_0 , se décharge dans une bobine d'inductance L et de résistance quasiment nulle.

- 1- Schématise le circuit.
- 2- Établis l'équation différentielle du circuit.
- 3- Compare-la à celle d'un oscillateur mécanique.
- 4- Trouve une solution de l'équation différentielle.
- 5- Représente graphiquement la charge électrique $q(t)$ et l'intensité $i(t)$ du courant électrique.

Je fais le point de l'activité

1- Équation différentielle des oscillations

Soit q la charge du condensateur et i l'intensité du courant électrique à l'instant t , dans le circuit électrique schématisé ci-contre.

Pendant la durée élémentaire dt , la bobine reçoit du condensateur, la charge $dq = i dt$.

La tension aux bornes du condensateur est :

$$u_c = \frac{q}{C}.$$

La tension aux bornes de la bobine est : $u_L = L \frac{di}{dt}$.

D'après la loi des mailles, on a : $u_c + u_L = 0$, donc

$$\frac{q}{C} + L \frac{di}{dt} = 0$$

$$L \frac{d^2q}{dt^2} + \frac{q}{C} = 0 \text{ ou } \ddot{q} + \frac{q}{LC} = 0 : \text{c'est l'équation différentielle du circuit LC.}$$

Elle peut s'écrire sous la forme : $\ddot{q} + \omega_0^2 q = 0$ avec $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$, $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$:

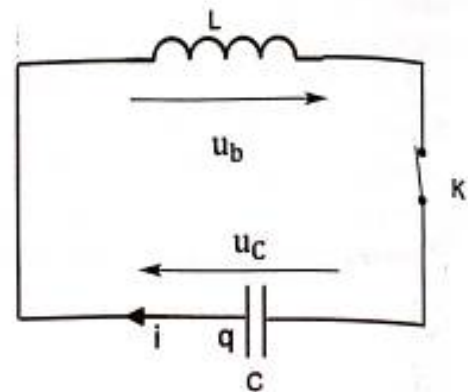
pulsation propre du circuit car elle n'est fonction que de l'inductance L de la bobine et de la capacité C du condensateur, deux éléments propres au circuit électrique.

C'est l'équation différentielle d'un oscillateur harmonique. Un circuit LC est un oscillateur harmonique tout comme le pendule élastique (k, m) dont le mouvement est régi par l'équation $\ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0$.

2- Solution de l'équation différentielle

Une solution de l'équation différentielle est de la forme $q(t) = Q_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$ avec :

- $q(t)$ la charge du condensateur à l'instant de date t ;
- Q_m la charge maximale ;
- $\omega_0 t + \varphi$ la phase à l'instant t ;
- φ la phase à l'origine des dates $t = 0$.



Remarque : Q_m et φ sont déterminés à partir des conditions initiales.

La période propre du circuit est : $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}$

La fréquence propre du circuit est : $N_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

La décharge et la charge d'un condensateur dans une bobine d'inductance L et de résistance négligeable produit des oscillations sinusoïdales.

L'expression du courant de décharge ou de charge à un instant t est : $i(t) = \frac{dq}{dt}$ si $q = Q_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$

Alors $i(t) = -\omega_0 Q_m \sin(\omega_0 t + \varphi) = +\omega_0 Q_m \cos(\omega_0 t + \varphi + \frac{\pi}{2})$

La différence de phase entre $i(t)$ et $q(t)$:

$$\Delta\varphi = (\omega_0 t + \varphi + \frac{\pi}{2}) - (\omega_0 t + \varphi) = \frac{\pi}{2}$$

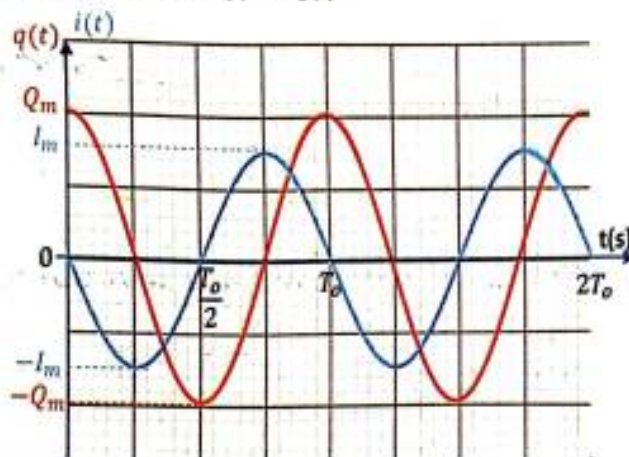
Ce qui correspond à un décalage horaire ΔT tel que :

$$\left. \begin{array}{l} 2\pi \rightarrow T_0 \\ \Delta\varphi \rightarrow \Delta T \end{array} \right\} 2\pi \Delta T = T_0 \Delta\varphi$$

Soit $\Delta T = \frac{\Delta\varphi}{2\pi}$; $\Delta T = \frac{T_0}{2\pi} \cdot \Delta\varphi$ or $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$. Donc : $\Delta T = \frac{T_0}{4}$

$i(t)$ est donc en quadrature avance sur $q(t)$.

3- Représentation graphique de $i(t)$ et $q(t)$



Variation de l'intensité et de la charge dans le circuit. $i(t)$ est en quadrature avance sur $q(t)$.

J'évalue mes acquis



Un condensateur de capacité C , initialement chargé, se décharge dans une bobine d'inductance $L = 10 \text{ mH}$.

La tension aux bornes du condensateur à un instant de date t est de la forme :

$u(t) = 5\cos 100\pi t$ avec u en volts et t en secondes.

- 1- Précise l'amplitude U_m de la tension aux bornes du condensateur et la pulsation propre du circuit.
- 2- Calcule la période propre T_0 du circuit.

ACTIVITÉ 4 : INTERPRÉTER LES ÉVOLUTIONS DE LA CHARGE DU CONDENSATEUR ET DU COURANT ÉLECTRIQUE SUR UNE PÉRIODE T

- 1- Établis les expressions de la charge et du courant électriques à partir des conditions initiales : $t = 0, q = Q_m$.
- 2- Trace les allures des graphes $q = f(t)$ et $i = g(t)$ sur une période.
- 3- Identifie à partir des graphes $q(t)$ et $i(t)$, les intervalles de charge et de décharge du condensateur sur une période.

- 4- Schématise le circuit LC sur chaque intervalle d'étude.
- 5- Identifie le rôle du condensateur et celui de la bobine dans chaque intervalle.
- 6- Établis l'analogie oscillateur mécanique-oscillateur électrique.

Je fais le point de l'activité

Pour les conditions initiales suivantes à $t = 0$, $q = Q_m$, déterminons la valeur algébrique de la phase initiale φ .

$$q = Q_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$$

Nous avons à $t = 0$, $q_A = q = Q_m$ avec $Q_m > 0$ et $i = 0$, $q = Q_m = Q_m \cos(\omega_0 \times 0 + \varphi)$.

donc $Q_m = Q_m \cos \varphi$. Ce qui entraîne

$$\cos \varphi = 1 \text{ soit } \varphi = 0 \text{ rad.}$$

L'expression de la charge électrique devient :

$$q = Q_m \cos \omega_0 t$$

$$\text{D'autre part : } i = \frac{dq}{dt} = -Q_m \omega_0 \sin \omega_0 t ;$$

$$i = I_m \cos\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right)$$

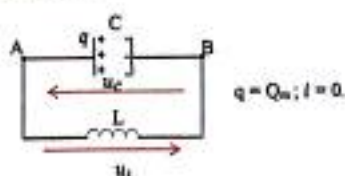
Ainsi $I_m = \omega_0 Q_m$; ω_0 est en rad.s^{-1} , Q_m en C et I_m en A.

• À la date $t = 0$

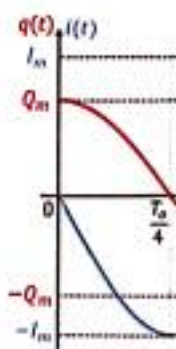
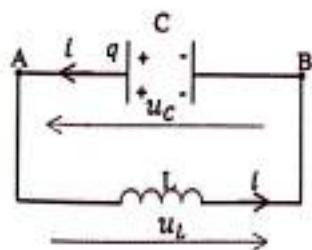
Schéma du circuit LC à la date $t = 0$.

$$E_e = \frac{1}{2} C U_c^2$$

$$E_m = 0$$

• Intervalle $0 < t < \frac{T}{4}$.

- Schéma du circuit sur l'intervalle



Expressions et signes des tensions.

$$u_c = \frac{q}{C} ; u_c > 0 \text{ car } q > 0 \text{ et } u_L = L \frac{di}{dt} < 0 \text{ car } \frac{di}{dt} < 0$$

(La courbe $i = g(t)$ est décroissante).

Sens du courant électrique.

À la fermeture du circuit, les électrons circulent de l'armature B chargée négativement vers l'armature A chargée positivement en passant par les fils conducteurs. L'armature portant la charge q du condensateur reçoit des électrons, q diminue.

$$i = \frac{dq}{dt} < 0.$$

Le courant électrique i circulant de l'armature A vers l'armature B est négatif dans ce premier quart de période.

Le condensateur joue le rôle de générateur durant ce premier quart de période.

Le condensateur, en se déchargeant, fournit à la bobine de l'énergie. La bobine joue le rôle de récepteur.

La puissance fournie par le condensateur est négative. En effet $P_c = u_c i < 0$ car $u_c > 0$ et $i < 0$.

La bobine emmagasine l'énergie, la puissance reçue est positive. $P_L = u_L i > 0$ car $u_L < 0$ et $i < 0$.

• À la date $t = \frac{T}{4}$

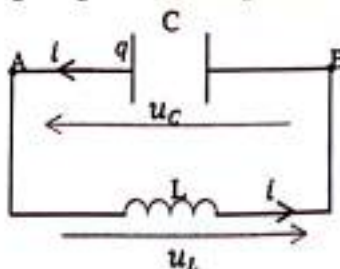
Schéma du montage à la date $t = \frac{T}{4}$.

La charge est nulle et l'intensité du courant est minimale.

$$q = 0 ; i = -I_m.$$

$$E_e = 0$$

$$E_m = \frac{1}{2} L I_m^2$$

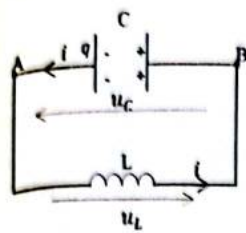


• Intervalle $\frac{T}{4} < t < \frac{T}{2}$.

Schéma du circuit oscillant sur l'intervalle.

Expressions et signes des tensions.

Dans cet intervalle : $q < 0$; $i < 0$.



$u_C = \frac{q}{C}$; $u_C < 0$ car $q < 0$ et $u_L = L \frac{di}{dt}$; $u_L > 0$ car $\frac{di}{dt} > 0$
(La courbe $i = g(t)$ est croissante).

Sens du courant électrique.

Les électrons circulent toujours de l'armature B, qui se charge positivement, vers l'armature A qui se charge négativement. Le courant électrique circule de l'armature A vers l'armature B. Ce courant est négatif.

- Le condensateur, jouant le rôle de récepteur durant ce quart de période, se charge. Sa charge passe de 0 à $-Q_m$. Il reçoit de l'énergie de la bobine.
- La puissance reçue par le condensateur est alors positive. En effet : $P_C = u_C \cdot i > 0$ car $u_C < 0$ et $i < 0$.
- bobine jouant le rôle de générateur charge le condensateur. La puissance qu'elle fournit est alors négative. En effet $u_L > 0$ et $i < 0$. $P_L = u_L \cdot i < 0$.

• À la date $t = \frac{T}{2}$.

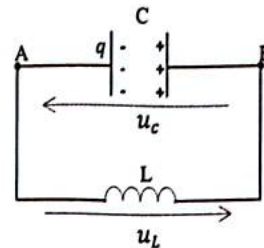
Schéma du circuit à la date $t = \frac{T}{2}$.

L'intensité du courant est nulle et la charge est minimale.

$q = -Q_m < 0$; $i = 0$.

$$E_e = \frac{1}{2} C U_{\max}^2$$

$$E_m = 0$$

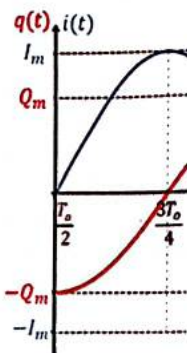
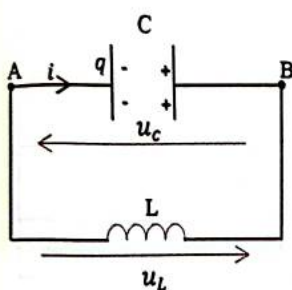


• Intervalle $\frac{T}{2} < t < \frac{3T}{4}$.

Schéma du circuit oscillant sur l'intervalle

Expressions et signes des tensions.

Dans cet intervalle : $q < 0$; $i > 0$.



$u_C = \frac{q}{C} < 0$ car $q < 0$ et $u_L = L \frac{di}{dt} > 0$ car $\frac{di}{dt} > 0$
(La courbe $i = g(t)$ croît).

Sens du courant électrique.

Les électrons circulent maintenant de l'armature A chargée négativement vers l'armature B chargée positivement. L'armature A portant la charge q perd des électrons, sa charge augmente. La variation de la charge par rapport au temps augmente : $i = \frac{dq}{dt} > 0$.

Le courant électrique circulant de l'armature B vers l'armature A est positif.

Le condensateur jouant le rôle de générateur durant ce troisième quart de période se décharge. Sa charge passe de $-Q_m$ à 0, il fournit de l'énergie à la bobine.

La puissance cédée par le condensateur est alors négative. En effet : $P_C = u_C \cdot i < 0$ car $u_C < 0$ et $i > 0$.

La bobine joue le rôle de récepteur. Elle reçoit de l'énergie. La puissance reçue est alors positive.

De fait : $u_L > 0$ et $i > 0$, $P_L = u_L \cdot i > 0$.

• À la date $t = \frac{3T}{4}$.

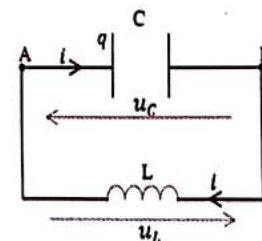
Schéma du circuit à la date $t = \frac{3T}{4}$.

Le courant est maximal et la charge est nulle.

$q = 0$; $i = I_m$.

$$E_e = 0$$

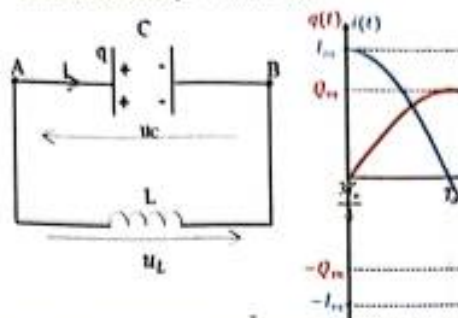
$$E_m = \frac{1}{2} L I_{\max}^2$$



- Intervalle $\frac{3T}{4} < t < T$.

Schéma du circuit sur l'intervalle

À la date t : $q > 0$; $i > 0$.



Expressions et signes des tensions

$$u_C = \frac{q}{C} > 0 \text{ car } q > 0 \text{ et } u_L = L \frac{di}{dt} < 0 \text{ car } \frac{di}{dt} < 0.$$

(La courbe $i = g(t)$ décroît).

Sens du courant électrique.

Les électrons circulent toujours de l'armature A vers l'armature B. Le courant électrique circule alors de l'armature B vers l'armature A, ce courant est positif. Le condensateur joue le rôle de récepteur durant ce quatrième quart de période.

Le condensateur se charge, sa charge passe de 0 à Q_m , il reçoit de l'énergie de la bobine.

La puissance reçue par le condensateur est alors positive. En effet $P_C = u_C \cdot i > 0$ car $u_C > 0$ et $i > 0$.

La bobine joue le rôle de générateur. La bobine charge le condensateur, la puissance fournie est alors négative. En effet, $u_L < 0$ et $i > 0$, $P_L = u_L \cdot i < 0$.

Analogie oscillateur mécanique-oscillateur électrique

Les équations différentielles des oscillateurs mécanique et électrique sont respectivement :

$$\ddot{x} + \frac{k}{m} x = 0 \text{ et } \ddot{q} + \frac{1}{LC} q = 0.$$

Un circuit électrique LC se comporte comme un pendule élastique constitué d'un ressort de raideur k et une masse m en l'absence de frottement.

Ainsi une analogie formelle entre le circuit LC et le pendule élastique s'établit comme suit.

GRANDEURS ÉLECTRIQUES DU CIRCUIT LC	GRANDEURS MÉCANIQUES DU PENDULE ÉLASTIQUES (MASSE + RESSORT)
Charge q	Abscisse x
Intensité i du courant électrique	Vitesse v
Inductance L de la bobine	Masse m du solide
$\frac{1}{C}$ (où C est la capacité du condensateur)	Constante de raideur k du ressort
Tension électrique U	Intensité F de la force appliquée

J'évalue mes acquis



- 1- Détermine sur une période le nombre d'intervalles de charge et de décharge du condensateur.
- 2- Indique le rôle du condensateur et de la bobine dans chaque intervalle.

ACTIVITÉ 5 : RÉALISER L'ÉTUDE ÉNERGÉTIQUE DU CIRCUIT LC

- 1- Établis l'expression de l'énergie emmagasinée E_e dans le condensateur.
- 2- Établis l'expression de l'énergie emmagasinée E_m dans la bobine.
- 3- Établis de l'expression de l'énergie totale E_t du circuit.

Je fais le point de l'activité

À un instant de date t :

L'énergie emmagasinée dans le condensateur est sous forme électrique.

En prenant $\varphi = 0$, alors, on a : $E_e = \frac{1}{2} C u^2 = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} = \frac{1}{2C} Q_m^2 \cos^2 \omega_0 t = \frac{1}{4C} Q_m^2 (1 + \cos 2\omega_0 t)$.

L'énergie emmagasinée dans la bobine est de nature magnétique : $E_m = \frac{1}{2} L i^2 = \frac{1}{2} L I_m^2 \sin^2 \omega_0 t$.

Sachant que : $LC\omega_0^2 = 1$ et donc $L = \frac{1}{C\omega_0^2}$, alors : $E_m = \frac{1}{2} \frac{1}{C\omega_0^2} I_m^2 \sin^2 \omega_0 t = \frac{1}{2} \frac{1}{C\omega_0^2} Q_m^2 \sin^2 \omega_0 t$

$$E_m = \frac{1}{2C} Q_m^2 \sin^2 \omega_0 t = \frac{1}{4C} Q_m^2 (1 - \cos^2 \omega_0 t)$$

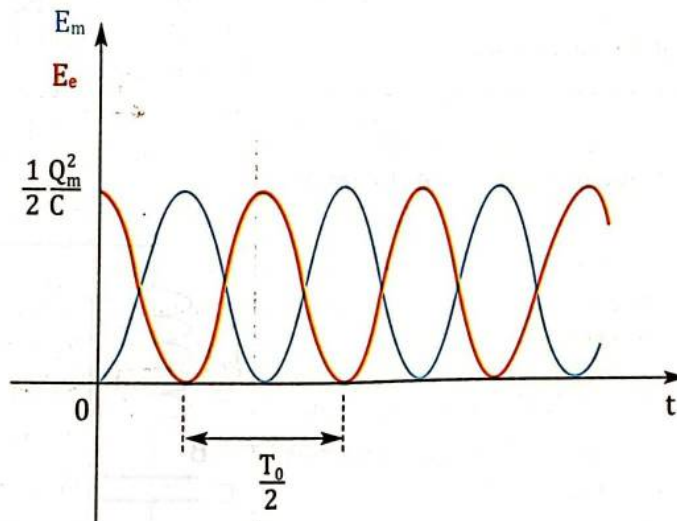
- L'énergie emmagasinée dans le condensateur ou dans la bobine varie périodiquement dans le temps avec une période égale à $\frac{T_0}{2}$

- Énergie totale dans le circuit à l'instant de date t

$$E = E_e + E_m = \frac{1}{2C} Q_m^2 (\cos^2 \omega_0 t + \sin^2 \omega_0 t) = \frac{1}{2C} Q_m^2 ; \quad E = \frac{1}{2} C U_0^2 = \frac{1}{2} L I_m^2 = \text{cte}$$

Au cours des oscillations d'un circuit LC purement inductif, l'énergie totale se conserve.

Il y a donc un échange permanent d'énergie entre la bobine et le condensateur.



Les énergies emmagasinées respectivement dans le condensateur (E_e) et dans la bobine (E_m) sont périodiques, de période $\frac{T_0}{2}$

J'évalue mes acquis

Recopie et complète les phrases ci-dessous avec les mots ou expressions qui conviennent.

- 1- L'énergie électrique emmagasinée dans un condensateur a pour expression
- 2- L'énergie emmagasinée dans une bobine est sous forme magnétique.....
- 3- Au cours des oscillations d'un circuit LC purement inductif, l'énergie totale

ACTIVITÉ 6 : ENTRETEENIR LES OSCILLATIONS ÉLECTRIQUES DANS UN CIRCUIT LC

Des oscillations électriques ont lieu dans un circuit LC.

En réalité, la résistance d'une bobine n'est jamais nulle.

- 1- Montre l'influence de la résistance interne de la bobine sur les oscillations électriques.
- 2- Explique l'entretien des oscillations avec un circuit intégré linéaire.

Je fais le point de l'activité

- Une bobine possède toujours une résistance interne. Une partie de la puissance électrique égale à ri^2 est donc dissipée par effet Joule dans la bobine. Ce qui fait que les oscillations électriques sont toujours plus ou moins amorties.

- Pour éviter l'amortissement des oscillations électriques, il faut compenser l'énergie dissipée par effet Joule à chaque instant. C'est donc le rôle d'un générateur branché aux bornes du circuit LC qui fournit au reste du circuit une puissance électrique égale à la puissance dissipée.

Si ce générateur débite un courant d'intensité i , alors il fournit au reste du circuit une puissance :

$$\mathcal{P}_f = u_{MA} \cdot i = ri^2 \text{ soit } u_{MA} = ri \text{ ou } u_{AM} = -ri \text{ (figure 1).}$$

Ce générateur, appelé circuit intégré linéaire, se comportant comme une « résistance négative ».

On parle d'entretien des oscillations électriques.

- Montrons que l'équation différentielle du circuit entretenu est bien celle d'un oscillateur harmonique.

En considérant la maille ABMA, on peut écrire (figure 2) :

$$u_L + u_c + u_{AM} = 0$$

$$ri - e + \frac{q}{c} - ri = 0$$

$$ri + L \frac{d^2q}{dt^2} + \frac{q}{c} - ri = 0 \text{ soit } L \frac{d^2q}{dt^2} + \frac{q}{c} = 0.$$

C'est l'équation différentielle d'un oscillateur harmonique ; ce qui explique l'obtention des oscillations non amorties à l'oscilloscope.

Dans la pratique on utilise un amplificateur opérationnel (AO) pour réaliser un tel générateur branché aux bornes du circuit LC.

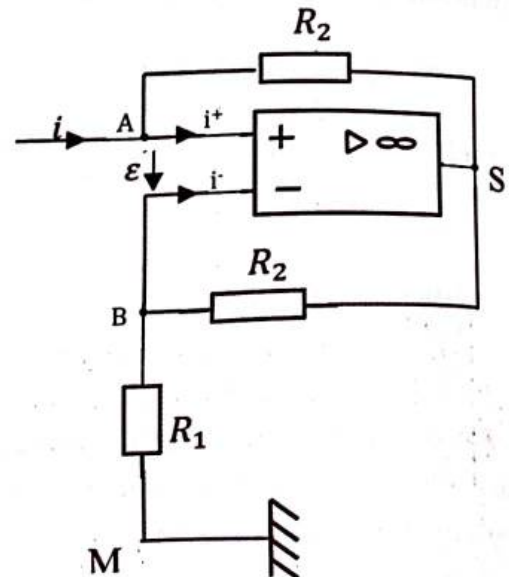


Figure 1

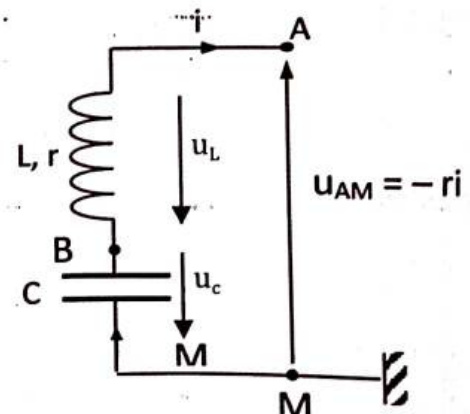
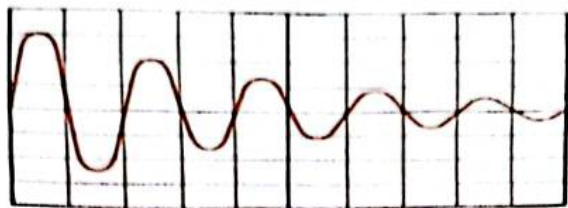


Figure 2

J'évalue mes acquis



Un condensateur de capacité C , initialement chargé, se décharge dans une bobine d'inductance L et de résistance interne r . On visualise la tension u_c aux bornes du condensateur à l'aide d'un oscilloscope (voir figure ci-dessous).



- 1- Nomme l'élément à l'origine de l'amortissement.
- 2- Dis pourquoi les oscillations sont amorties.
- 3- Dis ce qu'il faut faire pour rendre les oscillations sinusoïdales.

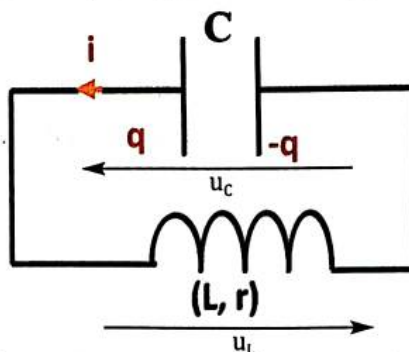
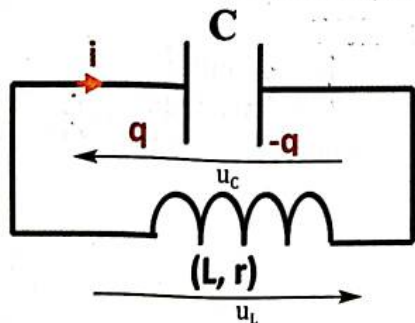
II- RÉSUMÉ DE COURS

- Un circuit LC est le siège d'oscillations électriques amorties. La résistance du circuit est responsable de l'amortissement des oscillations, comme les forces de frottements (dus au support) sont responsables de l'amortissement des oscillations mécaniques dans le cas d'un pendule élastique. Il existe donc une analogie formelle entre le circuit LC et le pendule élastique (k, m).
- L'énergie totale d'un circuit LC purement inductif se conserve. Mais elle peut se retrouver soit à la fois entre la bobine et le condensateur soit la totalité dans la bobine ($E = \frac{1}{2} L i_m^2$) ou dans le condensateur ($E = \frac{1}{2} C u_m^2$).
- Pour avoir des oscillations non amorties, il faut entretenir le circuit LC grâce à un générateur se comportant comme une résistance « négative » branché aux bornes du circuit LC permettant de compenser exactement la perte d'énergie par effet Joule.

III- MÉTHODES

Comment s'y prendre pour établir l'équation différentielle d'un circuit LC :

- 1- Faire le schéma selon qu'il s'agit d'une charge ou une décharge en faisant apparaître le sens de $i(t)$.



- 2- Représenter la tensions u_c aux bornes du condensateur et la tension u_L aux bornes de la bobine, sachant que ces deux tensions sont opposées du fait du transfert d'énergie entre le condensateur et la bobine et inversement.
- 3- Écrire la relation entre ces deux tensions (charge ou décharge) : $u_c + u_L = 0$ (1).
- 4- Écrire les expressions des tensions aux bornes du condensateur et de la bobine.

- 3- Remplacer les expressions des tensions aux bornes du condensateur et de la bobine dans la relation (1).
- 4- Les expressions des tensions aux bornes du condensateur $u_c = \frac{q}{C}$ et aux bornes de la bobine $u_l = \frac{L di}{dt}$ sont indépendantes du sens du courant dans le circuit. Ces expressions sont aussi indépendantes de l'état de charge et de décharge du condensateur.
- 5- En remplaçant l'expression de l'intensité i à l'instant t , tu obtiens l'équation différentielle :

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{q}{C} = 0.$$

IV- EXERCICES RÉSOLUS

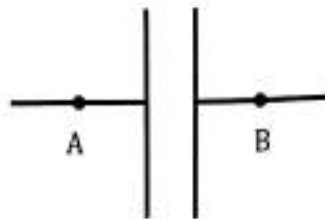
Exercice 1

Un circuit LC est constitué d'une bobine d'inductance $L = 0,2 \text{ H}$ et d'un condensateur de capacité $C = 0,1 \text{ F}$.
Calcule :

- 1- la pulsation ω_0 propre du circuit ;
- 2- La fréquence propre N_0 .

Exercice 2

On charge un condensateur de capacité $C = 2 \mu\text{F}$ sous une tension constante $U_{AB} = 12 \text{ V}$.



- 1- Calcule les charges des armatures A et B.
- 2- Donne la nature de l'énergie emmagasinée dans le condensateur.
- 3- Calcule la valeur de cette énergie.

Exercice 3

Un circuit LC est caractérisé par une pulsation propre $\omega_0 = 500 \text{ rad.s}^{-1}$.

- 1- Calcule la capacité C du condensateur pour $L = 0,2 \text{ H}$.
- 2- Le condensateur, préalablement chargé, se décharge dans la bobine.
A l'instant $t = 0$, la charge du condensateur est $q_0 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ C}$ et l'intensité i est nulle.
 - 2.1- Donne l'expression de la tension instantanée u_c aux bornes du condensateur.
 - 2.2- Etablis l'expression de l'intensité du courant en fonction du temps.

Résolution de l'exercice 1

- 1- Calcul de la pulsation propre ω_0

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{AN : } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{0,1 \times 0,2}} = 7,07 \text{ rad/s}$$

- 2- Fréquence propre

$$N_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{AN : } N_0 = \frac{1}{2 \times 3,14 \sqrt{0,1 \times 0,2}} = 1,12 \text{ Hz}$$

Se reporter aux formules de la pulsation et de la fréquence.

Résolution de l'exercice 2

1- Calcul de q_A et q_B

$$q_A = CU_{AB} = 2 \cdot 10^{-6} \times 12 \quad q_A = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ C} ; q_B = -2,4 \cdot 10^{-5} \text{ C}$$

2- Nature de l'énergie emmagasinée dans le condensateur

Cette énergie est de nature électrique.

3- La valeur

$$E_m = \frac{1}{2} CU^2 = \frac{q^2}{2C} \quad \text{AN : } E_m = \frac{[2,4 \cdot 10^{-5}]^2}{2 \times 2 \cdot 10^{-6}} = \frac{2,4 \times 2,4 \cdot 10^{-4}}{2 \times 2} \quad E_m = 1,44 \cdot 10^{-4} \text{ J}$$

Commentaire :

Il est nécessaire de connaître les formules de la charge électrique et de l'énergie magnétique emmagasinée.

Les charges des deux armatures sont opposées.

Résolution de l'exercice 3

1- Capacité du condensateur :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\omega_0^2 LC = 1 \text{ soit } C = \frac{1}{\omega_0^2 L} \quad \text{AN : } C = \frac{1}{500^2 \times 0,2} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ F}$$

2-

2.1- Expression de la tension $u(t)$

La bobine est sans résistance interne, la décharge du condensateur donne des oscillations sinusoïdales régies par l'équation $q(t) = q_0 \cos(\omega_0 t + \varphi)$

$$\text{À } t = 0, q(0) = q_0 \cos \varphi = q_0 \text{ soit } \cos \varphi = 1 \text{ soit } \varphi = 0. \quad q = 4 \cdot 10^{-3} \cos 500t$$

2.2- Calcul de $i(t)$

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = -\omega_0 q_0 \sin 500t ; \text{AN : } i(t) = -500 \times 4 \cdot 10^{-3} \sin 500t = -2 \sin 500t.$$

Commentaire :

L'expression de la pulsation propre permet de déduire la capacité du condensateur.

Aussi, il faut toujours se servir des conditions initiales (la valeur de q et la valeur de i à $t = 0$) pour déterminer avec exactitude l'expression de q ou de i .

V- JE M'EXERCE

Exercices de fixation / Application

1 Recopie le chiffre de chaque affirmation et écris à la suite, la lettre V si l'affirmation est vraie ou la lettre F si elle est fausse.

- 1- La décharge d'un condensateur dans un conducteur ohmique est oscillante.
- 2- L'amortissement des oscillations électriques libres est dû à la résistance totale du circuit.
- 3- Dans un circuit L, C résistif, l'énergie totale du circuit est constante.
- 4- La pseudo-période des oscillations amorties augmente lorsque la capacité du condensateur augmente.

2 Un circuit LC a une période propre notée T_0 . Cette période a pour expression :

- a) $T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{L}{C}}$; b) $T_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$;
 c) $T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{C}{L}}$; d) $T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$.

Recopie la lettre correspondant à la bonne réponse.

3 Un circuit oscillant possède une inductance $L = 1,2 \text{ mH}$ et une capacité $C = 3,4 \text{ }\mu\text{F}$.

- 1- La pulsation propre du circuit LC est :
 a) 15656 rad/s ; b) $156,56 \text{ rad/s}$;
 c) $1565,6 \text{ rad/s}$.
- 2- La période propre T_0 du circuit LC est :
 a) $4 \cdot 10^{-3} \text{ s}$; b) $4 \cdot 10^{-5} \text{ s}$; c) $4 \cdot 10^{-4} \text{ s}$.
- 3- La fréquence propre N_0 est :
 a) 250 Hz ; b) 2500 Hz ; c) 25000 Hz .

Recopie le numéro suivi de la lettre correspondant à la bonne réponse pour chacune des propositions.

4 Recopie et complète le texte ci-dessous avec les mots et groupes de mots suivants :
 linéaire ; transfert d'énergie ; sinusoïdales ; amorties ; négative ; diminue.

Au cours des oscillations d'un circuit LC dont la résistance de la bobine est supposée négligeable, l'énergie totale se conserve. Il y a unentre le condensateur et la bobine et inversement.

En réalité, la résistance de la bobine n'est pas négligeable ; il s'ensuit que les oscillations d'un circuit LC sont toujoursAinsi, l'énergie

emmagasinée dans le circuit électriqueà cause de résistance de la bobine. Pour rendre les oscillations....., il faut compenser la perte d'énergie. Cela peut être réalisé grâce à un générateur G de résistance appelé générateur.....

5 Reproduis et établis l'analogie entre l'oscillateur électrique et l'oscillateur mécanique en reliant la grandeur électrique à la grandeur mécanique.

Grandeur électrique	Grandeur mécanique
$\frac{1}{C}$ •	• x
R •	• $E_c = \frac{1}{2} mv^2$
q •	• k
i •	• v
$E_e = \frac{q^2}{2C}$ •	• $a = \ddot{x}$
L •	• m
$E_e = \frac{1}{2} Li^2$ •	• $E_c = \frac{1}{2} kx^2$
	• f

6 Un condensateur de capacité $C = 0,1 \text{ }\mu\text{F}$ est chargé aux bornes d'un générateur de tension continue $U = 120 \text{ V}$. A l'instant $t = 0 \text{ s}$, le condensateur est branché aux bornes d'une bobine idéale réalisant un circuit oscillatoire de période propre $T_0 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ s}$.

- 1- La charge maximale du condensateur est :
 a) $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ C}$; b) $41,2 \cdot 10^{-5} \text{ C}$; c) 12 C
- 2- La pulsation propre du circuit LC est :
 a) 3140 rad/s ; b) $314,0 \text{ rad/s}$;
 c) 31400 rad/s .
- 3- L'inductance L de la bobine est :
 a) $0,1 \text{ H}$; b) $0,01 \text{ H}$; c) 1 H

Recopie le numéro suivi de la lettre correspondant à la bonne réponse pour chacune des propositions.

Exercices de renforcement / Approfondissement

7 Soit les schémas ci-dessous dans lesquels le courant électrique d'intensité i sera compté positivement dans le cas a et négativement dans le cas b.

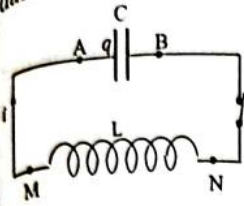


Schéma a

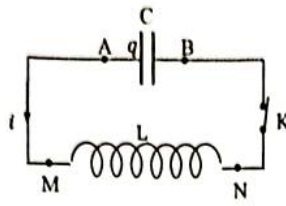


Schéma b

pour chaque schéma :

- 1- donne la relation entre i et $\frac{dq}{dt}$;
- 2- exprime les tensions u_{AB} et u_{MN} en fonction de q , L , C et t ;
- 3- établis l'équation différentielle régissant les variations de q ;
- 4- déduis la pulsation propre ω_0 .

8 Un condensateur de capacité $C = 30 \mu\text{F}$ et de charge $Q = 4.10^{-4} \text{ C}$ est connecté à l'instant $t = 0 \text{ s}$ aux bornes d'une bobine d'inductance $L = 0,1 \text{ H}$ et de résistance négligeable.

L'expression de la charge $q(t)$ du condensateur en fonction du temps est alors de la forme :

$$q(t) = Q_m \cos(\omega_0 t + \varphi).$$

Détermine les grandeurs Q_m , ω_0 et φ .

9 Un condensateur de capacité $C = 1 \mu\text{F}$ initialement chargé sous une tension $U = 20 \text{ V}$, est branché aux bornes d'une bobine d'inductance $L = 40 \text{ mH}$. Détermine :

- 1- la fréquence propre N_0 des oscillations libres ;
- 2- l'intensité maximale I_m du courant dans le circuit.

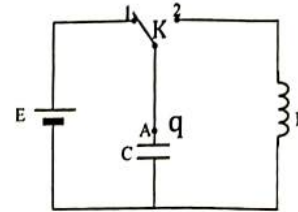
10 Un condensateur de capacité $C = 5 \mu\text{F}$, est initialement chargé sous une tension $U_{AB} = 10 \text{ V}$. On branche ensuite ce condensateur aux bornes d'une bobine d'inductance $L = 50 \text{ mH}$ dont la résistance est considérée comme nulle.

- 1- Calcule la période propre T_0 des oscillations qui s'établissent dans le circuit.
- 2- Dis si ces oscillations sont amorties.
- 3- Calcule l'énergie E emmagasinée dans le circuit.
- 4- Détermine :
 - 4.1- la charge q_A du condensateur lorsque l'intensité du courant est 50 mA pendant la décharge du condensateur ;
 - 4.2- l'intensité I du courant lorsque la tension

aux bornes du condensateur vaut 5 V pendant la charge du condensateur.

11 Soit le montage ci-dessous où l'inductance est égale à $L = 10 \text{ mH}$, le générateur a pour force électromotrice $E = 10 \text{ V}$ et le condensateur a une capacité $C = 1 \mu\text{F}$.

La bobine a une résistance interne négligeable. L'interrupteur K est placé en position 1 pendant un temps suffisamment long pour permettre la charge totale du condensateur.



1- Détermine :

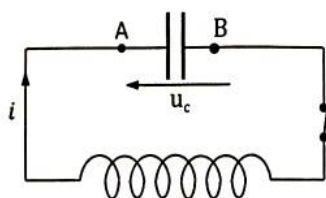
- 1.1- la tension U_C aux bornes du condensateur ;
- 1.2- la charge Q_A portée par l'armature A ;
- 1.3- l'énergie électrostatique E_e emmagasinée dans le condensateur.

2- A l'instant $t = 0$, K est placé sur la position 2.

- 2.1- Établis l'équation différentielle traduisant la variation de la charge q du condensateur.
- 2.2- Calcule la pulsation propre ω_0 du circuit.

3- Représente les schémas de la charge du condensateur et du courant du circuit entre les dates $0 < t < \frac{T}{4}$ et $\frac{T}{2} < t < \frac{3T}{4}$.

12 On considère le montage de la figure ci-dessous. Le condensateur est préalablement chargé sous une tension $U_{AB} = 6 \text{ V}$. À l'instant $t = 0$, on ferme l'interrupteur K . L'intensité du courant est positive lorsque le courant circule dans le sens indiqué sur la figure.



Données :

$C = 1 \mu\text{F}$; $L = 10 \text{ mH}$

- 1- Établis l'équation différentielle en charge électrique du circuit oscillant.
- 2- Détermine la charge initiale q_A du condensateur.
- 3- Calcule la pulsation propre ω_0 et la fréquence propre N_0 de l'oscillateur.
- 4- La solution générale de l'équation différentielle du circuit est : $q_A = Q_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$.

- 4.1- Détermine les grandeurs Q_m et φ .
- 4.2- Dédus les expressions de q_A et i en fonction du temps.

Situations d'évaluation

13 En vue de faire l'étude énergétique d'un circuit électrique oscillant, votre professeur de Physique-Chimie met à votre disposition le schéma ci-dessous (voir Figure 1). Vous réalisez le montage et vous placez l'inverseur K d'abord en position 1 et ensuite en position 2. Vous observez alors sur l'écran de l'oscilloscope une courbe (voir Figure 2).

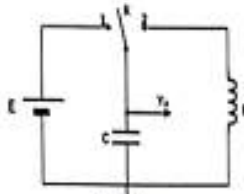


Figure 1



Figure 2

Le condensateur a une capacité $C = 0,1 \mu\text{F}$ et la bobine à une inductance L inconnue et une résistance négligeable.

Échelles : 1 carreau pour 2 V (vertical) et 1 carreau pour 1 ms (horizontal).

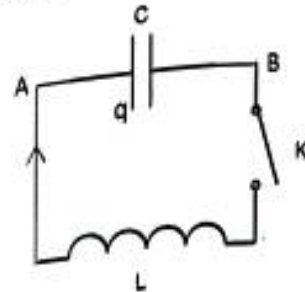
L'origine des dates est prise à l'instant où q prend sa valeur maximale.

- 1- Nomme le phénomène mis en évidence.
- 2- Détermine
 - 2.1- la période propre T_0 et la pulsation propre ω_0 du circuit LC ;
 - 2.2- la valeur de l'inductance L de la bobine ;
 - 2.2- la charge maximale Q_m du condensateur.
- 3- Détermine :
 - 3.1- la charge $q(t)$ du condensateur ainsi que l'intensité $i(t)$ du courant ;
 - 3.2- l'énergie $E_c(t)$ emmagasinée dans le condensateur ;
 - 3.3- l'énergie $E_m(t)$ emmagasinée dans la bobine ;
- 4- Détermine l'énergie électromagnétique du circuit LC.

14 Le club scientifique de ton établissement te sollicite pour aider un groupe d'élèves à réviser le cours sur les oscillations électriques libres. Tu t'appuies alors sur un circuit électrique constitué d'un condensateur de capacité $C = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ F}$ préalablement chargé sous une tension $U = 20 \text{ V}$. Ce condensateur est ensuite relié à une bobine d'inductance $L = 25 \text{ mH}$ dont on néglige la

- 4.3- Indique les intervalles de décharge et de charge du condensateur sur une période

résistance. A un instant pris comme origine des temps, on ferme l'interrupteur K (figure).



L'intensité $i(t)$ du courant est comptée positivement quand le courant circule dans le sens indiqué sur le schéma.

On appelle $q(t)$ la charge de l'armature reliée au point A, et on précise qu'à l'instant $t = 0$ cette armature est chargée négativement.

Ta production est attendue.

- 1- Calcule :
 - 1.1- la charge initiale q_A du condensateur ;
 - 1.2- l'énergie initiale emmagasinée E_0 dans le condensateur.
- 2- Établis l'équation différentielle de ce circuit oscillant.
- 3- Calcule la pulsation propre ω_0 de ce circuit.
- 4- Établis :
 - 4.1- les expressions numériques des fonctions $q(t)$ et $i(t)$;
 - 4.2- les expressions numériques des fonctions $E_c(t)$ et $E_m(t)$ des énergies stockées dans le condensateur et la bobine ;
 - 4.3- la relation entre $E_c(t)$, $E_m(t)$ et la valeur E_0 trouvées à la question 1.

15 Lors d'une séance de travaux pratiques (TP), votre professeur vous confie l'étude de l'entretien des oscillations électriques. Vous réalisez le circuit ci-dessous (figure 1) dans lequel l'amplificateur opérationnel est supposé idéal, parfait et fonctionne en régime linéaire.

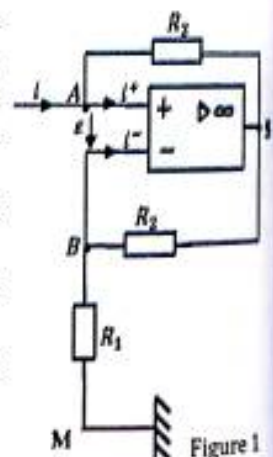


Figure 1

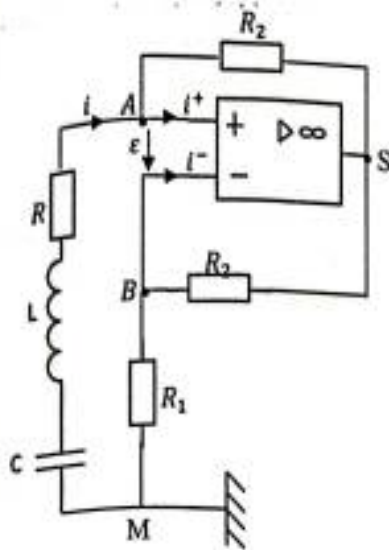


Figure 2

Vous cherchez la condition sur la résistance R_1 pour que le circuit soit un oscillateur harmonique. Pour ce faire, vous introduisez le dipôle AM aux bornes d'un circuit RLC (figure 2).

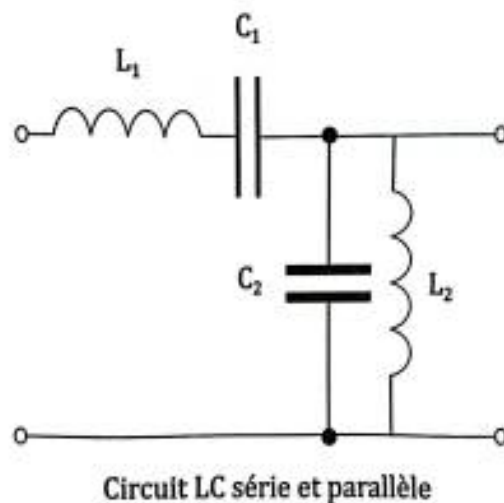
Tu es le rapporteur du groupe

Données : $i^+ = i^- = 0 \text{ A}$

- 1- Définis un oscillateur harmonique.
- 2- Montre que le dipôle AM est un dipôle à résistance négative.
- 3- Établis l'équation différentielle vérifiée par la charge q du condensateur.
- 4- Dédus la condition sur R_1 pour que le circuit soit un oscillateur harmonique.

VI- RENDEZ-VOUS DES CURIEUX

Un circuit LC série ou parallèle joue le rôle de filtre dit filtre passe bande ou filtre coupe bande. Les circuits LC sont dits circuits résonants. Ils sont utilisés dans la transmission sans fil en radiodiffusion autant pour l'émission que la réception car ils peuvent générer de hautes tensions et courants que ceux qu'ils reçoivent. Ils sont aussi utilisés en radiocommunication pour adapter ou filtrer les signaux. Ils jouent le rôle de filtres. Par exemple, dans un récepteur de radio, on peut trouver des réglages de tonalité pour augmenter ou réduire les sons graves (basses fréquences) ou sons aigus (hautes fréquences) du signal audio. Ces commandes correspondent à des filtres.



LEÇON

11

CIRCUIT RLC SÉRIE EN RÉGIME SINUSOÏDAL FORCÉ

TABEAU DES HABILETÉS ET DES CONTENUS

HABILETÉS	CONTENUS
Définir	le courant alternatif et sinusoïdal
Connaître	- la relation entre : - les tensions maximale et efficace d'une tension alternative et sinusoïdale ; - les intensités maximale et efficace d'un courant alternatif et sinusoïdal ; - la période d'une tension alternative et sinusoïdale ; - la phase $\varphi_{u,i} = \frac{Z}{T} \theta$; - l'impédance du dipôle RLC ($Z = \frac{U}{I}$) ; - l'unité d'impédance.
Utiliser	- la relation entre : - les tensions maximale et efficace d'une tension alternative et sinusoïdale ; - les intensités maximale et efficace d'un courant alternatif sinusoïdal ; - la période d'une tension alternative et sinusoïdale. - la phase $\varphi_{u,i} = \frac{Z}{T} \Delta t$. - l'impédance du dipôle RLC ($Z = \frac{U}{I}$).
Construire	le diagramme de Fresnel.
Connaître	les expressions des grandeurs suivantes : - impédance Z ; - $\tan \varphi_{u,i} = \cos \varphi_{u,i}$ et $\sin \varphi_{u,i}$.
Connaître	les expressions des grandeurs suivantes : - impédance Z ; - $\tan \varphi_{u,i} = \cos \varphi_{u,i}$ et $\sin \varphi_{u,i}$.

NOTIONS ESSENTIELLES

- Courant alternatif et sinusoïdal
- Tension alternative et sinusoïdale
- Différence de phase
- Intensité efficace
- Tension efficace
- Intensité maximale
- Tension maximale
- Période et fréquence d'une tension alternative
- Impédance du dipôle RLC
- Circuit inductif
- Circuit capacitif
- Circuit résistif

SITUATION D'APPRENTISSAGE

Dans la cour de l'école du Lycée Classique de Bouaké, deux élèves de la Terminale D₁ échangent sur un circuit série comprenant une résistance R, une bobine L et un condensateur C en série. L'un soutient que ce circuit se comporte de la même manière en courant alternatif qu'en courant continu et que la tension et le courant sont toujours en phase en courant alternatif. L'autre soutient le contraire.

Afin de s'accorder et comprendre le comportement du dipôle RLC série en régime sinusoïdal forcé, ils entreprennent avec leurs camarades de classe et sous la supervision de leur professeur de Physique-Chimie, de déterminer les caractéristiques du courant alternatif, de construire le diagramme de FRESNEL et d'établir les expressions de l'impédance Z et de la phase φ .



I- ACTIVITÉS

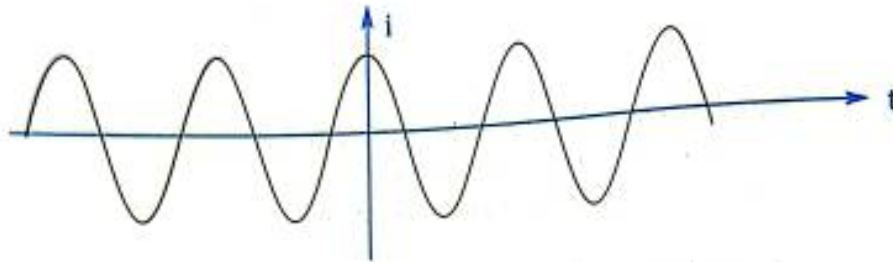
ACTIVITÉ 1 : RAPPELER LES PROPRIÉTÉS DU COURANT ALTERNATIF ET SINUSOÏDAL

- 1- Définis un courant alternatif et sinusoïdal.
- 2- Donne les expressions de l'intensité et de la tension instantanées.

Je fais le point de l'activité

1- Définition d'un courant alternatif et sinusoïdal

Un courant alternatif et sinusoïdal est un courant dont l'intensité est une fonction sinusoïdale du temps.



2- Expressions de l'intensité et de la tension instantanées

Les expressions de l'intensité et de la tension instantanées sont de la forme :

- $i(t) = I_m \cos(\omega t + \varphi_i)$;
- $u(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi_u)$ où ;
 - U_m et I_m sont les valeurs maximales de u et i ;
 - ω , la pulsation ($\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi N$) en radian par s (rad.s^{-1}) ;
 - T , la période en secondes (s) ;
 - N ou f , la fréquence en hertz (Hz) ;
 - φ , la phase en radian (rad).

Les valeurs de φ_1 et de φ_2 dépendent de l'origine des dates choisie.

Remarque :

- Si l'on choisit l'origine des dates telle que : $i(t) = I_m \cos \omega t$, alors $u(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi_{u/i})$ avec $\varphi = \varphi_u - \varphi_i = \varphi_{u/i}$
- Si l'on choisit l'origine des dates telle que : $u(t) = U_m \cos \omega t$ alors $i(t) = I_m \cos(\omega t - \varphi_{u/i})$.

J'évalue mes acquis

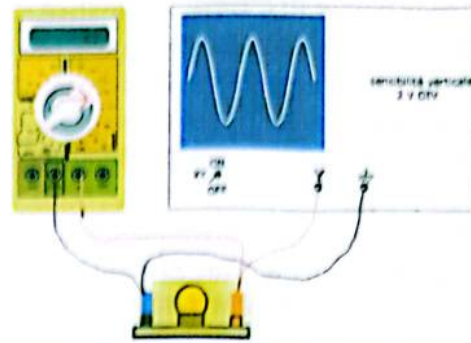


Soit la tension instantanée $u(t) = 311 \cos(314,2t - \frac{\pi}{2})$ avec u en volt (V) et t en seconde (s).

- 1- Donne la valeur de :
 - 1.1- la tension maximale U_m ;
 - 1.2- la pulsation ω ;
 - 1.3- la phase φ à l'origine.
- 2- Détermine la période T de la tension.

Activité 2 : DÉTERMINER EXPÉRIMENTALEMENT LA TENSION ET L'INTENSITÉ EFFICACES D'UN COURANT ALTERNATIF ET SINUSOÏDAL

- 1- Mesure, avec un voltmètre, la tension aux bornes d'une lampe fluorescente en courant alternatif.
- 2- Détermine, avec un oscilloscope, la tension maximale aux bornes de la lampe.
- 3- Compare la tension mesurée avec le voltmètre et la tension maximale mesurée avec l'oscilloscope.
- 4- Définis l'intensité efficace d'un courant alternatif.
- 5- Quelle relation existe-t-il entre les valeurs efficace et maximale de la tension et de l'intensité en courant alternatif?



Document 1 : Mesure des tensions efficace et tension maximale

Je fais le point de l'activité

1- Mesure de la tension efficace et détermination de la tension maximale

- Le voltmètre mesure $U = 4,2 \text{ V}$ aux bornes de la lampe.
- L'oscilloscope permet de lire 3 divisions pour la tension maximale, avec la sensibilité 2 V/division .

Ce qui donne la tension maximale $U_{\max} = 6 \text{ V}$.

$$U_{\max} > 4,2 \text{ V}$$

2- Définition de l'intensité efficace d'un courant alternatif

- L'intensité efficace I d'un courant alternatif est l'intensité d'un courant continu, qui traversant un même conducteur ohmique pendant la même période T , produirait par effet Joule, la même énergie thermique que le courant alternatif. Elle se mesure avec un ampèremètre en courant alternatif.
- L'intensité efficace est engendrée par une tension efficace mesurée avec un voltmètre.

3- Relation entre les valeurs efficaces et maximales de la tension et de l'intensité en courant alternatif

- Avec les mesures effectuées, on a : $\frac{U_{\max}}{U} = \frac{6}{4,2} = 1,4 = \sqrt{2}$.
- La valeur efficace U d'une tension alternative et sinusoïdale est égale au quotient de la valeur maximale U_m par $\sqrt{2}$. On écrit : $U_m = U\sqrt{2}$.
- L'intensité efficace I est liée à l'intensité maximale par la relation : $I_m = I\sqrt{2}$.

J'évalue mes acquis

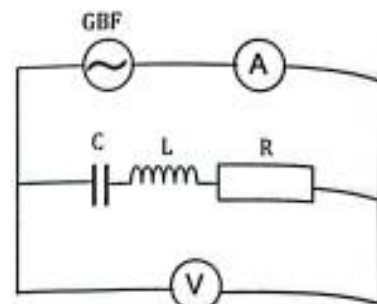


Soit la tension $u(t) = 311\cos(314,2t)$ avec u en volt (V) et t en seconde(s).
Détermine la valeur efficace U de cette tension.

ACTIVITÉ 3 : DÉTERMINER EXPÉRIMENTALEMENT L'IMPÉDANCE D'UN DIPÔLE RLC

Réalise le circuit RLC série schématisé ci-contre. Il est constitué d'un générateur de basses fréquences (GBF), d'une bobine d'inductance L et de résistance interne nulle, d'un conducteur ohmique de résistance R , d'un condensateur de capacité C , d'un voltmètre et d'un ampèremètre.

- 1- Fais varier, pour une fréquence donnée, la tension efficace U aux bornes de l'ensemble et relève les valeurs (U, I) dans un tableau.
- 2- Trace la caractéristique $U = f(I)$.
- 3- Montre que la tension efficace U est proportionnelle à l'intensité efficace I du courant.
- 4- Détermine le coefficient de proportionnalité.

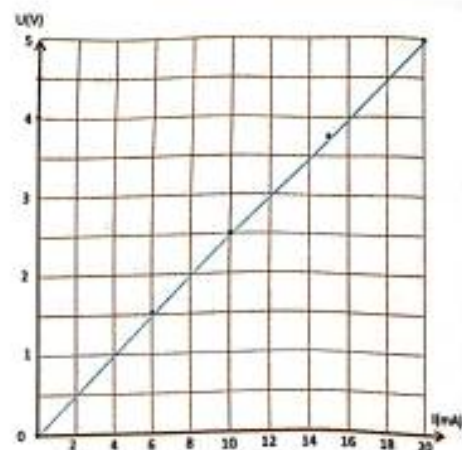


$N = 50 \text{ Hz}$; $R = 120 \Omega$;
 $C = 100 \mu\text{F}$; $L = 0,8 \text{ H}$.

Je fais le point de l'activité

1- Tableau de mesures et caractéristique $U = f(I)$

$I(\text{mA})$	0	6	10	15	20
$U(\text{V})$	0	1,50	2,50	3,75	5,00



- La caractéristique $U = f(I)$ est une droite passant par l'origine du repère, donc la tension U est proportionnelle à l'intensité I du courant électrique.
- Le coefficient de proportionnalité est : $\frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U}{I} = 250 \Omega$ est constant.
- La tension efficace U aux bornes d'un dipôle est proportionnelle à l'intensité efficace I du courant qui le traverse.
- Le coefficient de proportionnalité, notée Z est appelée impédance du dipôle.
 $U = Z \cdot I$; Z s'exprime en ohm (Ω).

Remarque : sachant que $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ et $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$, on peut écrire également $U_m = Z \cdot I_m$

J'évalue mes acquis

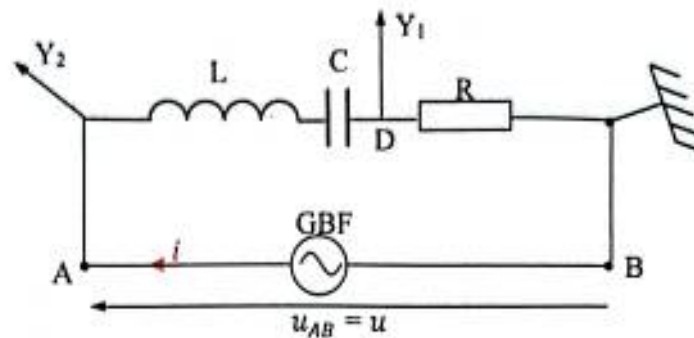


Un circuit RLC série, alimenté par une tension sinusoïdale de valeur efficace $U = 10 \text{ V}$, est parcouru par un courant électrique d'intensité efficace $I = 20 \text{ mA}$. Détermine l'impédance Z du dipôle RLC.

ACTIVITÉ 4 : DÉTERMINER EXPÉRIMENTALEMENT LA PHASE ENTRE LA TENSION AUX BORNES D'UN DIPÔLE RLC ET L'INTENSITÉ DU COURANT QUI LE PARCOURT

1. Réalise le montage expérimental schématisé ci-dessous.

$N = 50 \text{ Hz}$; $R = 120 \Omega$;
 $C = 100 \mu\text{F}$; $L = 0,8 \text{ H}$.



Un générateur de basses fréquences (GBF) impose une tension sinusoïdale u , de fréquence N ou de pulsation ω , au circuit RLC série.

- Visualise les deux grandeurs observées à l'oscilloscope et nomme-les.
- Détermine la phase de la tension $u(t)$ par rapport à l'intensité $i(t)$ du courant notée $\varphi_{u/i}$.
- Visualise les autres formes de courbes qu'on peut faire apparaître à l'oscilloscope en faisant varier la fréquence du GBF.

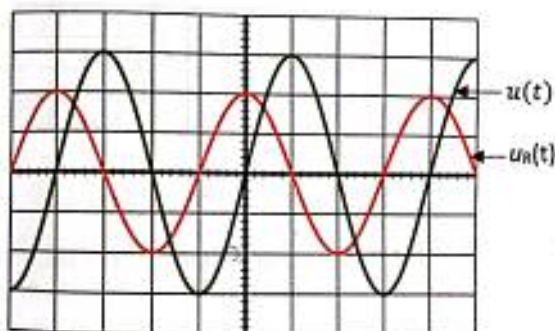
Je fais le point de l'activité

1- Les grandeurs visualisées

Les grandeurs visualisées sont :

- sur la voie Y_1 , la tension $u_R(t)$ aux bornes du conducteur ohmique ;
- sur la voie Y_2 , la tension $u(t)$ aux bornes du GBF ou du dipôle RLC.

La tension u_R aux bornes du conducteur ohmique étant proportionnelle à l'intensité i du courant électrique, on note que les variations de u_R sont proportionnelles à celle de l'intensité i du courant ($u_R = Ri$). Soit $i(t) = I_m \cos(\omega t)$ et $u(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi_{u/i})$, les expressions respectives de l'intensité du courant et de la tension aux bornes du dipôle RLC.



$N = 50 \text{ Hz}$; $R = 120 \Omega$; $C = 10 \mu\text{F}$;
 $L = 0,8 \text{ H}$.
 Sensibilité horizontale : 5 ms/div .

$u(t)$ est en retard par rapport à $i(t)$; $\varphi_{u/i} < 0$.

- La phase de $u(t)$ par rapport à $i(t)$ est traduite par le décalage horaire Δt .
- La différence de phase de la tension $u(t)$ par rapport à l'intensité $i(t)$ de courant est :
 $\varphi_{u/i} = \varphi_u - \varphi_i$
- De même, la différence de phase de l'intensité $i(t)$ par rapport à la tension $u(t)$ est :
 $\varphi_{i/u} = \varphi_i - \varphi_u$

- Cette différence de phase s'obtient à partir des deux courbes par la relation suivante :

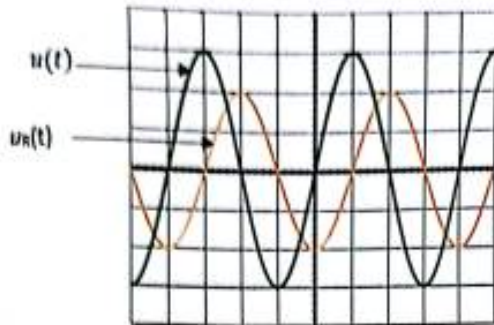
$$|\varphi_{u/i}| = \frac{2\pi\Delta t}{T} \text{ avec } \Delta t \text{ qui correspond à 1 div soit 1 carreau } (\Delta t: \text{délai en s})$$

et $T = 4 \text{ div}$ correspond à 4 carreaux (T : période en s)

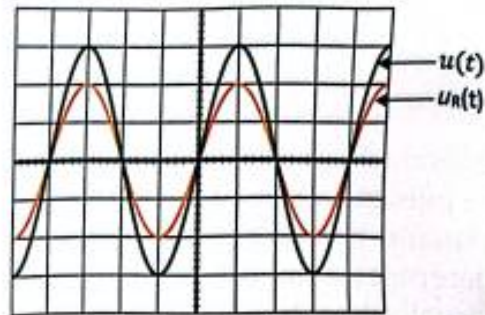
$$|\varphi_{u/i}| = \frac{2\pi \times 1}{4} = \frac{\pi}{2} \text{ rad.}$$

Dans le cas de l'expérience (courbe ci-dessus), comme $i(t)$ atteint son maximum en premier avant $u(t)$, alors $i(t)$ est en avance sur $u(t)$, c'est-à-dire $\varphi_{u/i} < 0$. D'où $\varphi_{u/i} = -\frac{\pi}{2} \text{ rad.}$

- En faisant varier la fréquence N , on obtient les deux autres oscillogrammes suivants :



$u(t)$ est en avance par rapport à $i(t)$; $\varphi_{u/i} > 0$



$u(t)$ et $i(t)$ sont en phase ; $\varphi_{u/i} = 0$

J'évalue mes acquis



On réalise le montage de la figure 1.

L'oscilloscope a été réglé de la façon suivante :

voie A : 1 V/div ; voie B : 5 V/div et base de temps : 2 ms/div

La figure 2 donne les oscillogrammes obtenus.

Figure 1

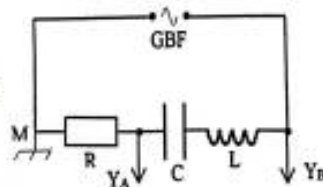
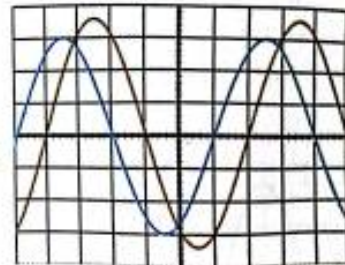
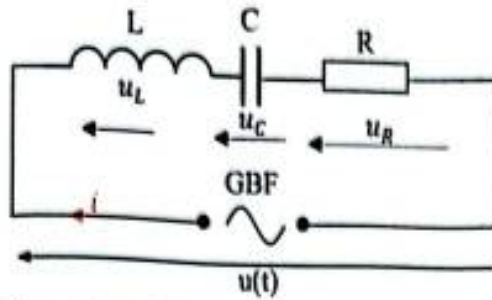


Figure 2



- 1- Indique les tensions visualisées sur les voies A et B.
- 2- Détermine, à partir de l'oscillogramme :
 - 2.1- la période T et la fréquence N de la tension aux bornes du dipôle RLC.
 - 2.2- l'amplitude :
 - 2.2.1- de la tension délivrée par le générateur ;
 - 2.2.2- de l'intensité du courant électrique sachant que $R = 20 \Omega$;
 - 2.3- la phase $\varphi_{u/i}$ de la tension par rapport à l'intensité.
- 3- Détermine l'impédance du dipôle RLC dans les conditions de l'expérience.
- 4- Écris en fonction du temps les expressions de $i(t)$ et de $u(t)$.



1. Établis l'équation différentielle du circuit.
2. Donne l'expression de l'impédance Z et de la phase $\varphi_{u/i}$ pour chaque dipôle dans le circuit RLC.
3. Construis le diagramme de Fresnel des tensions.
4. Déduis-en l'expression des grandeurs suivantes :
 - 4.1- l'impédance Z du dipôle RLC ;
 - 4.2- $\tan \varphi_{u/i}$, $\cos \varphi_{u/i}$ et $\sin \varphi_{u/i}$.

Je fais le point de l'activité

1- Équation différentielle du circuit :

- aux bornes du conducteur ohmique : $u_R = Ri$;
- aux bornes de la bobine : $u_L = L \frac{di}{dt}$;
- aux bornes du condensateur $u_C = \frac{q}{C}$.

D'après la loi des mailles, on a :

$$u = u_R + u_L + u_C$$

$$u = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{q}{C} ; \text{ or } i = \frac{dq}{dt} \Rightarrow q = \int i dt$$

$$u = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt : \text{ c'est l'équation différentielle du circuit RLC série.}$$

En prenant la phase de $i(t)$ comme origine des phases du circuit, on a :

$$i(t) = I_m \cos \omega t \text{ et } u(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi_{u/i}).$$

$$\text{On obtient alors : } u(t) = RI_m \cos \omega t + L \omega I_m \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) + \frac{I_m}{C \omega} \cos(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

Soit $U_m \cos(\omega t + \varphi_{u/i}) = RI_m \cos \omega t + L \omega I_m \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) + \frac{I_m}{C \omega} \cos(\omega t - \frac{\pi}{2})$: c'est aussi l'équation différentielle du circuit RLC série.

2- Expression de l'impédance de chaque dipôle et valeur algébrique de la phase $\varphi_{u/i}$.

- aux bornes du conducteur ohmique :

$u_R = RI_m \cos \omega t$; ainsi $U_{Rm} = R I_m$; l'impédance du conducteur ohmique est $Z_R = \frac{U_{Rm}}{I_m} = R$ et la phase $\varphi_{u_R/i} = 0 \text{ rad}$;

- aux bornes de la bobine :

$$u_L = L \frac{di}{dt} = -L \omega I_m \sin \omega t = L \omega I_m \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) = U_{Lm} \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) ; \text{ ainsi } U_{Lm} = L \omega I_m ;$$

l'impédance de la bobine pure est $Z_L = L \omega$ et sa phase $\varphi_{u_L/i} = \frac{\pi}{2} \text{ rad}$;

- aux bornes du condensateur :

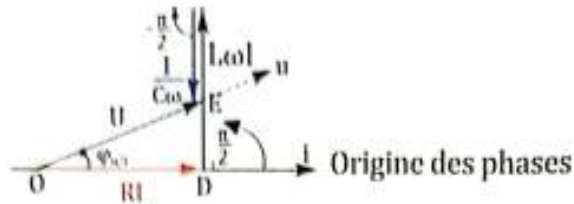
$$u_C = \frac{I_m}{C \omega} \sin \omega t = \frac{I_m}{C \omega} \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) = U_{Cm} \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) \text{ ainsi } U_{Cm} = \frac{I_m}{C \omega} ; \text{ l'impédance}$$

du condensateur est : $Z_C = \frac{U_{Cm}}{I_m} = \frac{1}{C \omega}$ et sa phase $\varphi_{u_C/i} = -\frac{\pi}{2} \text{ rad}$.

3- Diagramme de Fresnel

A toute grandeur sinusoïdale $u(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi_{u/i})$, est associée un vecteur de Fresnel. En associant des vecteurs de Fresnel aux différentes tensions, on obtient : $\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C$ avec : $U (U ; \varphi_{u/i}) ; U_R (RI ; 0) ; U_L (L\omega I ; + \frac{\pi}{2})$ et $U_C (\frac{I}{C\omega} ; - \frac{\pi}{2})$.

D'où le diagramme de Fresnel des tensions ci-dessous.



En considérant le triangle rectangle ODE, on obtient : $U^2 = (RI)^2 + (L\omega I - \frac{I}{C\omega})^2$.

$$U^2 = R^2 I^2 + [(L\omega - \frac{1}{C\omega})^2 I^2] = [R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2] I^2$$

$$\frac{U^2}{I^2} = R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2 \text{ or } Z = \frac{U}{I}$$

Donc : $Z = \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}$. Expression de l'impédance du circuit RLC en ohm (Ω)

D'après le diagramme de Fresnel :

$$\tan \varphi_{u/i} = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R} ; \cos \varphi_{u/i} = \frac{R}{Z} \text{ et } \sin \varphi_{u/i} = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{Z}$$

Remarque : si la résistance interne r de la bobine n'est pas négligeable alors on a :

$$- Z = \sqrt{(R+r)^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2} ; \tan \varphi_{u/i} = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R+r} ; \cos \varphi_{u/i} = \frac{R+r}{Z}$$

- Si $\varphi_{u/i} > 0$, c'est-à-dire $L\omega > \frac{1}{C\omega}$, alors u est en avance sur i : le circuit est dit inductif.

- Si $\varphi_{u/i} < 0$, c'est-à-dire $L\omega < \frac{1}{C\omega}$, alors u est en retard sur i : le circuit est dit capacitif.

- Si $\varphi_{u/i} = 0$, c'est-à-dire $L\omega = \frac{1}{C\omega}$, alors u et i sont en phase : on dit qu'on est à la résonance d'intensité et le circuit est dit résistif.

J'évalue mes acquis



Un circuit électrique est constitué d'un conducteur ohmique de résistance $R = 200 \Omega$, d'une bobine d'inductance $L = 0,1 \text{ H}$ et de résistance négligeable, et d'un condensateur de capacité $C = 1 \mu\text{F}$ placés en série. Il est alimenté par un générateur de basses fréquences qui délivre entre ses bornes une tension alternative et sinusoïdale u de fréquence $N = 250 \text{ Hz}$ et de valeur efficace $U = 5 \text{ V}$.

1- Détermine l'impédance :

- 1.1- Z du circuit RLC série ;
- 1.2- Z_R du conducteur ohmique ;
- 1.3- Z_b de la bobine ;
- 1.4- Z_c du condensateur.

2- Déduis-en :

2.1- l'intensité efficace I du courant qui traverse le circuit ;

2.2- les tensions efficaces U_R aux bornes du conducteur ohmique, U_L aux bornes de la bobine et U_C aux bornes du condensateur.

3- Représente le diagramme de Fresnel du circuit à l'échelle 1,5 cm pour 1 V et dis si le circuit est inductif ou capacitif.

4- Détermine graphiquement puis par le calcul, la phase $\varphi_{u/i}$ entre la tension et l'intensité.

II- RÉSUMÉ DE COURS

• Le courant alternatif et sinusoïdal est un courant électrique dont l'intensité est une fonction sinusoïdale du temps ; elle change de sens deux fois pendant chaque période. Son expression est de la forme : $i(t) = I_m \cos(\omega t + \varphi_i)$.

• La tension alternative et sinusoïdale est une fonction sinusoïdale de la forme :

$$u(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi_u).$$

• I_m et U_m sont les amplitudes respectives de l'intensité et de la tension.

Graphiquement, ces grandeurs sont déterminées par le produit de la sensibilité verticale par le nombre de divisions correspondant à la crête de la courbe avec $I_m = \frac{U_{Rm}}{R}$.

• $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ et $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ sont les valeurs efficaces respectives de la tension et de l'intensité.

Ces grandeurs sont mesurées respectivement à l'aide de voltmètre et d'ampèremètre.

• Impédance d'un dipôle

L'impédance Z d'un circuit RLC série est : $Z = \frac{U}{I} = \frac{U_m}{I_m}$. Z s'exprime en ohms (Ω).

En courant alternatif et sinusoïdal, les tensions efficaces (ou maximales) et les impédances ne s'additionnent pas.

• Différence de phase

Soient $u(t)$ et $i(t)$ deux grandeurs sinusoïdales telles que $u(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi_u)$ et

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \varphi_i).$$

On appelle différence de phase entre $u(t)$ et $i(t)$, la grandeur : $\varphi_{u/i} = \varphi_u - \varphi_i$.

En considérant $\varphi_i = 0$ rad comme origine des phases, on obtient :

$$i(t) = I_m \cos \omega t \text{ et } u(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi_{u/i}).$$

Si $\varphi_{u/i} > 0$, u est en avance sur i ; alors le circuit est inductif.

Si $\varphi_{u/i} < 0$, u est en retard sur i ; alors le circuit est capacitif.

Si $\varphi_{u/i} = 0$, u et i sont en phase ; alors on est à la résonance d'intensité et le circuit est résistif.

La phase de la tension $u(t)$ par rapport à l'intensité $i(t)$ s'écrit :

$$|\varphi_{u/i}| = \frac{2\pi \Delta t}{T} = \omega \Delta t = 2\pi N \Delta t \text{ avec } \Delta t \text{ le décalage horaire entre les courbes représentatives de } u(t) \text{ et } i(t) \text{ et } T \text{ la période des sinusoïdes.}$$

Lorsque $\varphi_{u/i} = \pm \frac{\pi}{2}$ rad, on parle de quadrature avance ou de quadrature retard de phase.

Lorsque $\varphi_{u/i} = \pm \pi$ rad, on parle d'opposition de phase.

• Diagramme de Fresnel

A une grandeur sinusoïdale u , on peut faire correspondre un vecteur de Fresnel $\vec{u}$ tel que : la norme du vecteur $\vec{u}$ est égale à l'amplitude de u ; l'angle entre le vecteur $\vec{u}$ et l'horizontale est égale à la phase à l'origine des dates.



Le diagramme de Fresnel permet d'établir les expressions littérales de Z , $\tan\varphi_{u/i}$, $\cos\varphi_{u/i}$ et $\sin\varphi_{u/i}$.

On a : $Z = \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}$ en ohm (Ω) ; $\tan\varphi_{u/i} = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}$; $\cos\varphi_{u/i} = \frac{R}{Z}$ et

$$\sin\varphi_{u/i} = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{Z}$$

Remarques :

- Si la bobine possède une résistance interne r , la résistance totale du circuit est $R + r$ et on a :

$$Z = \sqrt{(R + r)^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}$$

$$\tan\varphi_{u/i} = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R + r} \quad \text{et} \quad \cos\varphi_{u/i} = \frac{R + r}{Z}$$

- Si $L\omega > \frac{1}{C\omega}$ alors $\tan\varphi_{u/i} > 0$: la tension est en avance sur l'intensité du courant.

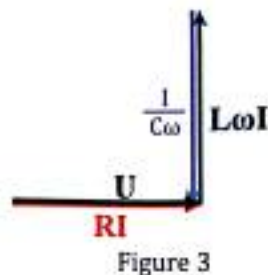
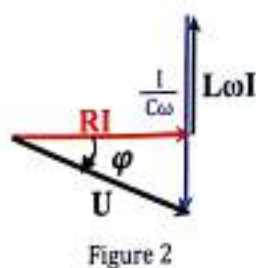
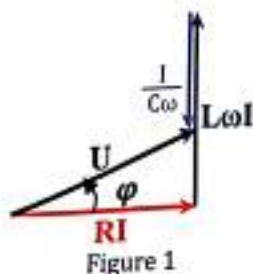
Le circuit est dit inductif. D'où le diagramme de Fresnel de la figure 1.

- Si $L\omega < \frac{1}{C\omega}$ alors $\tan\varphi_{u/i} < 0$: la tension est en retard sur l'intensité.

Le circuit est dit capacitif. D'où le diagramme de Fresnel de la figure 2.

- Si $L\omega = \frac{1}{C\omega}$ alors $\tan\varphi_{u/i} = 0$: la tension et l'intensité sont en phase.

On dit qu'il y a résonance d'intensité (figure 3).



III- MÉTHODES

- Détermination de l'intensité efficace I du courant qui traverse un dipôle RLC.

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

- Soit un dipôle AB constitué d'une bobine d'inductance L et de résistance interne r , d'un conducteur ohmique de résistance R et d'un condensateur de capacité C :

$$Z_R = R ; Z_L = L\omega ; Z_C = \frac{1}{C\omega} \text{ et } Z_{L,r} = \sqrt{r^2 + (L\omega)^2} ;$$

$$Z_{AB} = \frac{U_{AB}}{I} = \frac{U_{ABm}}{I_m} = \sqrt{(R+r)^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2} .$$

$$\tan \varphi_{u/i} = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R+r}$$

$$\tan \varphi_{u_b/i} = \frac{L\omega}{r} ; \varphi_{u_b/i} : \text{la phase de la tension aux bornes de la bobine par rapport au courant.}$$

- Détermination de l'équation différentielle

A partir de la loi des mailles ou bien la loi d'additivité des tensions, on établit que :

$$u = u_R + u_L + u_C \text{ avec } u_R = Ri ; u_L = L \frac{di}{dt} \text{ et } u_C = \frac{q}{C}$$

$$u = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{q}{C} \text{ or } i = \frac{dq}{dt} \Rightarrow q = \int i dt$$

$$\text{donc } u = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt .$$

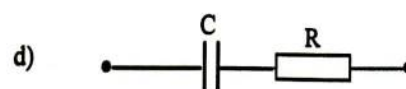
- Diagramme de Fresnel d'un dipôle RLC :

- Connaissant les impédances ou les tensions aux bornes des différents dipôles, on utilise l'échelle donnée pour déterminer les longueurs correspondantes.
- On trace l'axe (horizontal) origine des phases sur laquelle on représente U_R ou Z_R .
- À l'extrémité de U_R ou Z_R , on représente perpendiculairement en tournant de $\frac{\pi}{2}$, U_L ascendant ; à l'extrémité de U_L , on représente U_C , presque confondu à U_L , descendant.
- U ou Z part de l'origine de U_R ou Z_R et se termine à l'extrémité de U_C (voir les figures 1, 2 et 3 en fin de résumé).

IV- EXERCICES RÉSOLUS

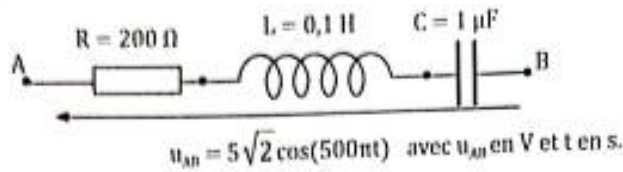
Exercice 1

Donne l'expression de l'impédance Z pour chaque portion de circuit schématisée ci-dessous.



Exercice 2

Soit le dipôle schématisé ci-dessous :

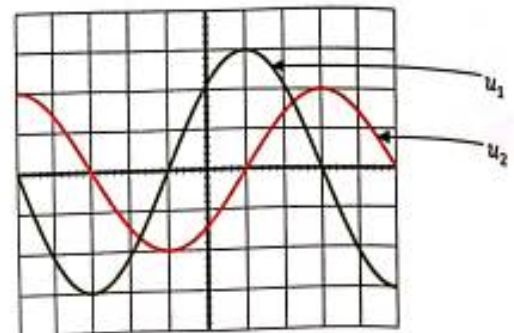


- 1- Détermine les impédances :
 - 1.1- Z_R du conducteur ohmique, Z_L de la bobine non résistive et Z_C du condensateur ;
 - 1.2- Z du dipôle RLC série.
- 2- Dis si le circuit est capacitif ou inductif. Justifie ta réponse.
- 3- Détermine l'intensité efficace I du courant qui traverse le circuit.

Exercice 3

On donne les oscillogrammes ci-contre.

- 1- Détermine pour chaque tension :
 - 1.1- la période T ;
 - 1.2- la fréquence N ;
 - 1.3- les amplitudes U_{1m} et U_{2m} .
- 2- Détermine la phase φ_{u_2/u_1} de u_2 par rapport à u_1 puis φ_{u_1/u_2} .



Sensibilité verticale : 2 V/div

Base des temps ou sensibilité horizontale : 100 ms/div

Résolution de l'exercice 1

Expression de l'impédance Z pour chaque portion de circuit.

- a) $Z = \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}$
- b) $Z = \sqrt{(R + r)^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}$
- c) $Z = \sqrt{(R + r)^2 + (L\omega)^2}$
- c) $Z = \sqrt{R^2 + (\frac{1}{C\omega})^2}$

Commentaire :

Connaître et savoir exploiter la relation de l'impédance du circuit RLC afin de l'adapter au type de circuit.

Résolution de l'exercice 2

1. Les impédances

1.1. $Z_R = R = 200 \, \Omega$

$$Z_L = L\omega = 157,08 \, \Omega$$

$$Z_C = \frac{1}{C\omega} = 636,6 \, \Omega$$

1.2. L'impédance Z

$$Z = \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2} = \sqrt{(200)^2 + (157,08 - 636,6)^2}$$

$$Z = 519,56 \, \Omega$$

2. Le circuit est capacitif car $Z_C > Z_L$

3. L'intensité efficace I du courant qui traverse le circuit $I = \frac{U}{Z} = 9,6 \cdot 10^{-3} \, A$

Commentaire :

- Connaître et appliquer l'expression de l'impédance de chaque dipôle.
- Savoir qu'un circuit peut être capacitif, inductif ou résistif.

Savoir déduire de l'expression $U = Z \cdot I$, les expressions de $Z = \frac{U}{I}$ et $I = \frac{U}{Z}$

Résolution de l'exercice 3

1. Déterminons pour chaque tension

1.1- la période

Pour la tension u_1 : $T_1 = 8 \times 100 = 800 \, ms = 0,8 \, s$

Pour la tension u_2 : $T_2 = 8 \times 100 = 800 \, ms = 0,8 \, s$

1.2- la fréquence

Pour la tension u_1 : $N_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0,8} = 1,25 \, Hz$

Pour la tension u_2 : $N_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{0,8} = 1,25 \, Hz$

1.3- L'amplitude U_{1m} et U_{2m}

$$U_{1m} = 3 \times 2 = 6 \, V$$

$$U_{2m} = 2 \times 2 = 4 \, V$$

2. Déterminons φ_{u_1/u_2} puis φ_{u_2/u_1}

Déterminons φ_{u_1/u_2}

$$|\varphi_{u_1/u_2}| = \frac{2\pi\Delta t}{T} \text{ or } \Delta t \text{ correspond à 2 div et } T \text{ correspond 8 div donc } |\varphi_{u_1/u_2}| = \frac{2\pi \times 2}{8} = \frac{\pi}{2} \text{ rad.}$$

Or u_1 est en avance sur u_2 donc $\varphi_{u_1/u_2} > 0$ d'où $\varphi_{u_1/u_2} = \frac{\pi}{2} \text{ rad.}$

Déterminons φ_{u_2/u_1}

$$\varphi_{u_2/u_1} = -\varphi_{u_1/u_2} = -\frac{\pi}{2} \text{ rad.}$$

Commentaire :

- La période $T = S_h \times d$ avec S_h : sensibilité horizontale ou base de temps et d : nombre de divisions ou nombre de carreaux en horizontale correspondant à la période.
- La période est la plus petite durée au bout de laquelle le phénomène se reproduit identique à lui-même.
- La fréquence correspond au nombre de périodes par seconde.
- L'amplitude $U_m = S_v \times d$ avec S_v : Sensibilité verticale et d : nombre de divisions ou nombre de carreaux en verticale correspondant à la crête de la courbe.
- Connaître et appliquer la relation $|\varphi_{u/i}| = \frac{2\pi\Delta t}{T}$
- La tension qui est en avance atteint son maximum en premier lorsqu'on évolue sur l'horizontale de la gauche vers la droite.

V- JE M'EXERCE*Exercices de fixation/ Application***1**

- 1- Définis un courant alternatif et sinusoïdal.
- 2- Précise ses caractéristiques.

2

Pour les affirmations suivantes, recopie le numéro de l'affirmation et écris V si elle est vraie ou F si elle est fausse.

- 1- L'impédance d'un dipôle RLC série est la résistance totale de ce dipôle.
- 2- De deux grandeurs sinusoïdales, celle qui en avance est la grandeur qui atteint sa valeur maximale la première.
- 3- L'impédance d'un dipôle RLC série se mesure à l'aide d'un ohmmètre.
- 4- En courant alternatif sinusoïdal, l'impédance d'une bobine dépend de la pulsation du courant.
- 5- La valeur 220 V de la tension du secteur est une grandeur maximale.

3 Reproduis les diagrammes puis relie, par un trait, chaque grandeur physique à son unité.

Grandeur physique	Unité
Impédance Z	• radian (rad)
Capacité C	• henry (H)
Résistance R	• farad (F)
Phase φ	• ohm (Ω)
Inductance L	
Charge Q	

4 Un dipôle D alimenté par une tension alternative et sinusoïdale $u(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi_{u/i})$ est traversé par un courant électrique d'intensité $i(t) = I_m \cos(\omega t)$.

1- La tension efficace U a pour expression :

a) $U_m \sqrt{2}$; b) $\frac{U_m}{\sqrt{2}}$; c) $\frac{U_m}{2}$

2- La phase $\varphi_{u/i}$ est déterminée par la relation :

a) $|\varphi_{u/i}| = \frac{2\pi}{T} \Delta t$; b) $|\varphi_{u/i}| = \frac{2\pi}{T}$;
c) $|\varphi_{u/i}| = \frac{2\pi}{\Delta t} \cdot T$

3- La phase de $i(t)$ par rapport à $u(t)$ est

a) $\varphi_{u/i}$; b) 0 rad ; c) $-\varphi_{u/i}$

Recopie le numéro de chaque option et écris la lettre correspondante à la bonne réponse.

5 Un dipôle comporte en série un résistor de résistance $R = 20 \Omega$, une bobine résistive d'inductance $L = 0,05 \text{ H}$ de résistance $r = 10 \Omega$ et un condensateur de capacité $C = 0,5 \mu\text{F}$.

La tension sinusoïdale aux bornes de l'ensemble a pour expression : $u = 6\sqrt{2} \cos(100\pi t + \varphi_{u/i})$.

1- L'impédance Z de ce dipôle a pour valeur :

a) 653,0 Ω ; b) 621,6 Ω ; c) 603,5 Ω

2- La tension efficace U aux bornes du dipôle a pour valeur :

a) $\sqrt{2} \text{ V}$; b) $6\sqrt{2} \text{ V}$; c) 6 V.

3- L'intensité efficace I du courant qui circule dans le circuit fermé a pour valeur :

a) 0,945 A ; b) 0,945 mA ; c) 9,65 mA.

- 4- La phase $\varphi_{u/i}$ a pour valeur :
 a) - 0,15 rad ; b) 1,56 rad ; c) - 1,52 rad.
 5- Le circuit constitué est :
 a) capacitif ; b) résonant ; c) inductif.
 Recopie la bonne réponse pour chacune des propositions.

6 Recopie puis complète les phrases ci-dessous avec les mots ou groupes de mots qui conviennent.

- 1- En régime sinusoïdal, la tension efficace aux

bornes d'un dipôle et l'intensité efficace du courant qui le traverse sont....

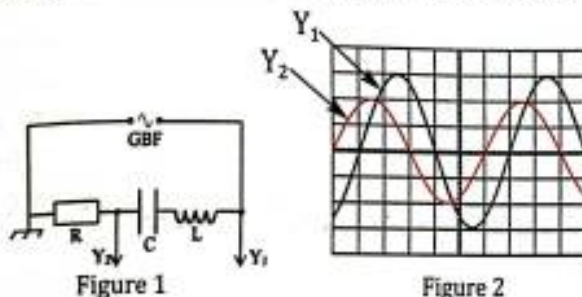
- 2- Lorsque la phase $\varphi_{u/i}$ est négative, la courbe de $u(t)$ est en.....sur celle de $i(t)$.
 3- En régime sinusoïdal, la tension maximale et l'intensité maximale sont liées par la relation....
 4- Lorsque les impédances de la bobine et du condensateur sont égales ($Z_L = Z_C$) alors le circuit est dit....

Exercices de renforcement/Approfondissement

7 On réalise le montage de la figure 1. L'oscilloscope a été réglé de la façon suivante :

- voie Y_1 : 2 V/div
 - voie Y_2 : 1 V/div
 - base de temps : 5 ms/div
- On donne $R = 15 \Omega$.

La figure 2 donne les oscillogrammes obtenus.



- 1- Nomme les tensions visualisées sur les voies Y_1 et Y_2 .
- 2- Détermine à l'aide des oscillogrammes :
 - 2.1- la période T du signal obtenu ;
 - 2.2- la phase $\varphi_{u/i}$ de la tension par rapport à l'intensité ;
 - 2.3- les valeurs efficaces U de la tension et I de l'intensité du courant.
- 3- Déduis l'impédance Z du circuit RLC.

8

- 1- On branche un voltmètre aux bornes d'une source de courant alternatif ; il indique 220 V. La fréquence du courant est $N = 50$ Hz. Détermine la valeur maximale de la tension de la source.
- 2- On dispose en série aux bornes de la source précédente un conducteur ohmique de résistance R , une bobine B de résistance interne r et d'inductance L et un ampèremètre.

L'ampèremètre indique $I = 3,5$ A.

Un voltmètre branché aux bornes du conducteur R indique $U_R = 40$ V et aux bornes de la bobine B , $U_B = 203$ V.

- 2.1- Détermine les impédances Z_R du conducteur ohmique, Z_B de la bobine et Z de l'ensemble {bobine-conducteur}.
- 2.2- Déduis les valeurs de R , r et L .
- 3- Détermine la différence de phase $\varphi_{u/i}$ entre la tension aux bornes de la source et l'intensité du courant.
- 4- Écris l'expression de l'intensité du courant en prenant comme origine des temps l'instant où la tension est maximale.

9 Entre deux points A et B, on monte en série, un conducteur ohmique de résistance $R = 12 \Omega$, une bobine de résistance interne négligeable et d'inductance L et un condensateur de capacité C . On applique entre A et B une tension sinusoïdale en volt : $u(t) = 120\sqrt{2}\sin(2\pi Nt + \varphi_1)$ où $U = 120$ V. L'expression du courant instantané est : $i(t) = I_{\max}\sin(2\pi Nt)$.



- 1- On fixe $L = 0,20$ H ; $C = 25 \mu F$ et $N = 60$ Hz.
 - 1.1- Vérifie que l'impédance est $Z = 33 \Omega$.
 - 1.2- Calcule l'intensité efficace I du courant.
 - 1.3- Détermine φ_1 .
- 2- On garde toujours les valeurs précédentes de N , R et L . Aussi le circuit est parcouru par le courant d'intensité efficace $I = 3,6$ A. La tension instantanée entre A et F s'écrit : $u_{AF}(t) = U_{AF}\sqrt{2}\sin(2\pi Nt + \varphi_2)$.

Détermine :

- 2.1- la tension efficace U_{AF} entre A et F.
- 2.2- la phase φ_2 et déduis l'expression $u_{AF}(t)$ en fonction du temps t .

10 Une portion de circuit électrique alimentée par une source de tension sinusoïdale de valeur efficace $U = 120 \text{ V}$ de pulsation ω comprend en série une bobine de résistance $r = 10 \Omega$ et d'inductance $L = 0,05 \text{ H}$, un condensateur de capacité $C = 2 \cdot 10^{-6} \text{ F}$

L'intensité instantanée du courant qui parcourt le circuit et la tension d'alimentation à ses bornes s'écrivent respectivement : $i(t) = I\sqrt{2} \sin(\omega t)$ et $u(t) = U\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_{u/i})$.

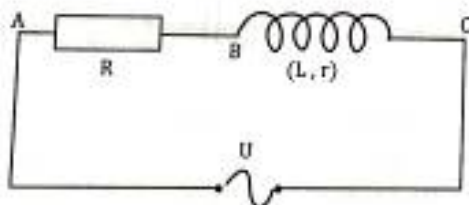
- 1- Donne, sans démontrer, les expressions littérales :
 - 1.1- de l'impédance Z du circuit ;
 - 1.2- de l'intensité efficace I du courant qui parcourt le circuit ;
 - 1.3- de la différence de phase de la tension par rapport à l'intensité $\varphi_{u/i}$
- 2- Calcule les valeurs de Z , I et $\varphi_{u/i}$ dans le cas où $\omega = 314 \text{ rad.s}^{-1}$.
- 3- Construis qualitativement le diagramme de Fresnel en impédances relatif au circuit.

11 Le dipôle AC ci-dessous est constitué d'une association en série d'un résistor de résistance $R = 20 \Omega$ et d'une bobine b de résistance r et d'inductance L inconnues.

Ce dipôle est alimenté par la tension sinusoïdale $u = U\sqrt{2} \sin(100 \pi t)$.

On mesure les tensions efficaces :

$U_{AB} = U_1 = 50 \text{ V}$; $U_{BC} = U_2 = 50 \text{ V}$ et $U_{AC} = U = 90 \text{ V}$.



La phase à l'origine de la tension est choisie

comme l'origine des phases.

- 1- Détermine :
 - 1.1- l'intensité efficace I du courant ;
 - 1.2- l'impédance totale Z_T du circuit et l'impédance Z_b de la bobine.
- 2- Construis le diagramme de Fresnel correspondant : échelle : 1 cm pour 10 V.
- 3- Détermine, à partir du diagramme, les éléments caractéristiques r et L de la bobine.
- 4- Retrouve ces résultats par le calcul.

12 Un circuit électrique en série est constitué d'un générateur de basses fréquences (GBF) qui délivre une tension sinusoïdale d'expression :

$u(t) = 10\sqrt{2} \cos(10^3 \pi t)$, d'un conducteur ohmique de résistance $R = 1000 \Omega$, d'un condensateur de capacité $C = 2 \mu\text{F}$, d'un ampèremètre et d'une bobine d'inductance $L = 0,5 \text{ H}$ de résistance négligeable.

- 1- Fais le schéma du montage et indique sur le schéma les branchements d'un oscilloscope pour visualiser l'allure des variations de la tension $u_R(t)$ aux bornes du conducteur ohmique de résistance R sur la voie Y_1 et les variations de la tension $u(t)$ aux bornes du générateur sur la voie Y_2 .
- 2- Détermine les tensions efficaces U_C aux bornes du condensateur ; U_L aux bornes de la bobine ; U_R aux bornes du conducteur ohmique.
- 3- Construis le diagramme de Fresnel des tensions efficaces de ce circuit. Échelle : 1 cm représente 1 V.
- 4- Détermine graphiquement la phase $\varphi_{u/i}$ de la tension $u(t)$ par rapport à l'intensité $i(t)$ et déduis la nature du circuit.

13 Un groupe d'élèves se propose de déterminer, au cours d'une séance de travaux pratiques, les valeurs de la résistance interne r et de l'inductance L d'une bobine.

Pour ce faire, ils réalisent un montage qui comporte :

- un générateur de basses fréquences (GBF) délivrant une tension alternative et sinusoïdale $u = U\sqrt{2} \cos \omega t$;
- un conducteur ohmique de résistance $R = 20 \Omega$;
- un oscilloscope bicourbe ;
- la bobine d'inductance L et de résistance interne r ;
- des fils de connexion.

Ce montage est schématisé par la figure 1 et l'oscillogramme obtenu est représenté par la figure 2.

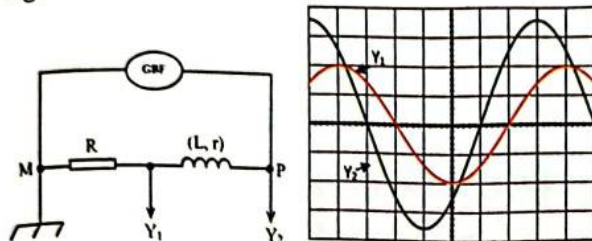


Figure 1

Figure 2

Sur les deux voies Y_1 et Y_2 de l'oscilloscope, le balayage horizontal a pour valeur $S_h = 2,5 \text{ ms.div}^{-1}$ et la sensibilité verticale est $S_v = 1 \text{ V.div}^{-1}$. On prendra $\cos \varphi_{u/i} = 0,707$.

Tu es invité(e) en à répondre aux consignes ci-dessous.

- 1- Nomme les deux grandeurs physiques visualisées à l'oscilloscope.
- 2- Précise la grandeur physique qui est en avance sur l'autre.
- 3- Détermine à partir de l'oscillogramme obtenu (figure 2) :
 - 3.1- la période T et la pulsation ω de la tension délivrée par le GBF ;
 - 3.2- la phase $\varphi_{u/i}$ de la tension u délivrée par le générateur par rapport à l'intensité i du courant ;
 - 3.3- les valeurs efficaces U de la tension u et I de l'intensité i du courant électrique.
- 4- Détermine :
 - 4.1- l'expression $i = f(t)$ de l'intensité du courant qui traverse le circuit ;

4.2- l'impédance Z du dipôle (PM) ;

4.3- la résistance interne r et l'inductance L de la bobine.

14 Au cours d'une séance de travaux pratiques, un groupe d'élèves d'un établissement de la place décide de déterminer expérimentalement les valeurs de l'inductance L et de la résistance r d'une bobine.

Pour cela, il réalise les deux expériences ci-dessous :

• Première expérience

Le groupe alimente d'abord la bobine à l'aide d'un générateur délivrant une tension continue. Le circuit est constitué du générateur de courant continu, de la bobine, d'un ampèremètre et d'un voltmètre. Le voltmètre mesure la tension $U_1 = 12 \text{ V}$ aux bornes du générateur ; l'ampèremètre indique une intensité $I_1 = 0,24 \text{ A}$ dans le circuit.

• Deuxième expérience

La bobine est ensuite alimentée par un générateur de basses fréquences (GBF) délivrant une tension alternative et sinusoïdale de fréquence $f = 200 \text{ Hz}$, de valeur efficace $U_2 = 5 \text{ V}$ mesurée par un voltmètre. L'ampèremètre mesure une intensité efficace $I_2 = 10 \text{ mA}$.

Tu es choisi (e) par ton groupe pour présenter les résultats de vos travaux.

- 1- Fais les schémas des montages en y faisant figurer le voltmètre et l'ampèremètre dans chacune de ces expériences.
- 2- Détermine la valeur de la résistance r de la bobine.
- 3- Détermine l'impédance Z_b de la bobine.
- 4- Déduis l'inductance L de la bobine.

15 Sous la conduite du professeur de Physique-Chimie, un groupe d'élèves de Terminale C réalise un circuit électrique série en vue d'établir les expressions de la tension électrique $u(t)$ et de l'intensité $i(t)$ du courant électrique. Pour ce faire, le professeur met à la disposition du groupe une bobine d'inductance L , un conducteur ohmique de résistance R , un condensateur de capacité C et un générateur de basses fréquences (G.B.F). Après avoir fixé la fréquence du G.B.F à N , le groupe réalise deux expériences.

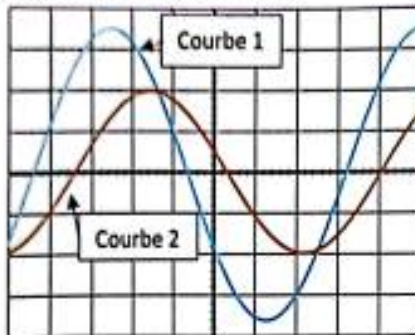
Expérience 1

Le groupe relève les valeurs efficaces de l'intensité I du courant électrique en faisant varier la tension électrique efficace U (voir tableau).

$U(V)$	1,50	2,50	3,75	5,00
$I(mA)$	6	10	15	20

Expérience 2

A l'aide d'un oscilloscope bicourbe, le groupe visualise les tensions électriques aux bornes du conducteur ohmique $u_R(t)$ et celle délivrée par le G.B.F $u(t)$ (voir oscillogrammes).



L'oscillogramme obtenu est représenté sur la figure.

Sensibilités verticales : voie 1 $u(t)$: 1 V/div ;

voie 2 $u_R(t)$: 1 V/div ;

Sensibilité horizontale : 2,5 ms/div.

Donnée : $R = 15 \Omega$

Tu es désigné(e) pour exploiter les résultats de ces expériences.

1- Trace sur une feuille de papier millimétré la courbe $U = f(I)$.

Échelles : 1 cm $\leftrightarrow$ 2,5 mA et 1 cm $\leftrightarrow$ 0,5 V

2- Détermine graphiquement l'impédance Z du circuit.

3- Représente qualitativement le diagramme de Fresnel en impédance du circuit RLC.

4- Établis les expressions numériques de :

4.1- l'intensité $i(t)$ du courant dans le circuit ;

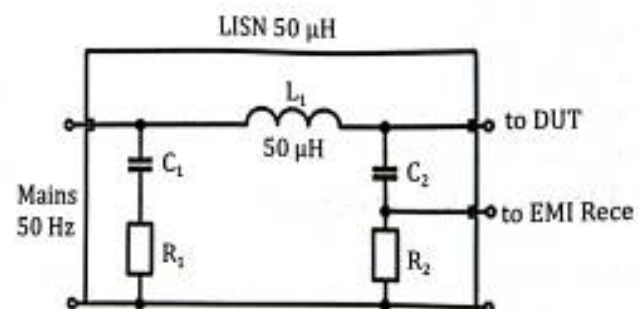
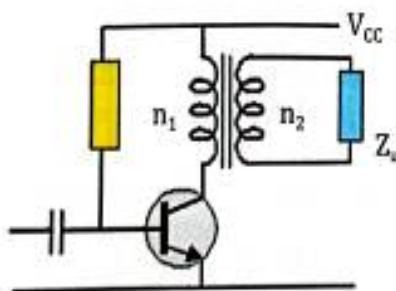
4.2- la tension $u(t)$ aux bornes du circuit.

VI- RENDEZ-VOUS DES CURIEUX

Les circuits RLC ont été utilisés très largement dans tous les récepteurs de radio et de télévision. Ils étaient utilisés pour filtrer des fréquences et pour générer le signal de l'oscillateur local. Ils apparaissent aussi, d'une façon un peu plus complexe dans les transformateurs FI (fréquence intermédiaire).

Pour ces applications, ils ont été largement remplacés par des filtres en céramique, et des boucles à verrouillage de phase.

On les voit aussi, tous les jours dans certains types d'étiquettes et des dispositifs anti-vol dans les magasins.



Schémas d'appareils comportant un circuit RLC

LEÇON 12

RÉSONANCE D'INTENSITÉ D'UN CIRCUIT RLC SÉRIE

TABEAU DES HABILETÉS ET DES CONTENUS

HABILETÉS	CONTENUS	
Tracer	la courbe de résonance d'intensité $I = f(N)$.	
Exploiter	la courbe de résonance d'intensité $I = f(N)$.	
Expliquer	- le phénomène de résonance d'intensité. - le phénomène de surtension à la résonance d'intensité.	
Définir	- la fréquence de résonance. - la bande passante.	le facteur de qualité.
Connaître	- les expressions : - de la fréquence de résonance d'intensité ; - de la bande passante ;	- du facteur de qualité ; - la valeur de la phase φ_{u_0} à la résonance d'intensité.
Déterminer	- la fréquence de résonance d'intensité. - la bande passante. - le facteur de qualité.	
Donner	quelques applications de la résonance : en mécanique;	- en électronique; - en acoustique.

NOTIONS ESSENTIELLES

- Intensité efficace I
- Tension efficace U
- Fréquence N ou pulsation ω de la tension excitatrice
- Fréquence propre N_0 ou pulsation propre ω_0
- Résonance d'intensité
- Courbe de résonance
- Bande passante
- Facteur de qualité
- Surtension

SITUATION D'APPRENTISSAGE

Lors d'un débat sur le chevauchement de fréquences des stations radio, un élève d'une classe de Tle D apprend que chaque poste récepteur a un circuit sélectif qu'on peut vérifier avec la courbe de résonance d'intensité.

De retour en classe, il partage l'information avec les autres élèves. Dans le souci de vérifier cette information, les élèves décident, avec l'aide de leur professeur de Physique-Chimie, de tracer la courbe de résonance d'intensité, d'expliquer le phénomène de résonance d'intensité et de déterminer la largeur de la bande passante.



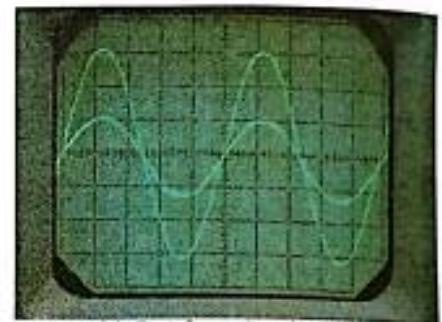
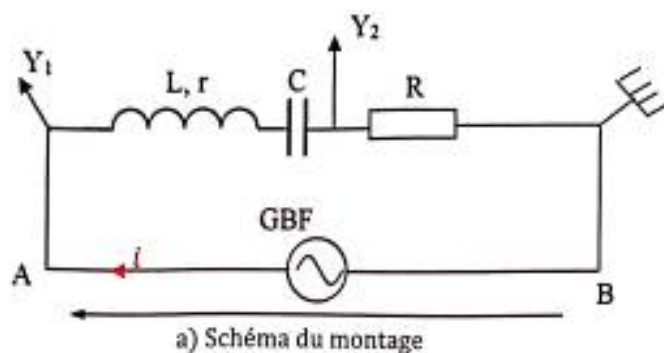
I- ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1 : RÉALISER LA RÉSONANCE D'INTENSITÉ D'UN CIRCUIT RLC SÉRIE

Tu as à ta disposition le matériel suivant : un générateur de basses fréquences, une bobine d'inductance L et de résistance r , un conducteur ohmique de résistance R , un oscilloscope bicourbe et des fils de connexion.

$R = 120 \, \Omega$; $r = 5 \, \Omega$; $C = 1 \, \mu\text{F}$; $L = 0,8 \, \text{H}$.

- 1- Réalise le montage expérimental schématisé sur le document 1a.
- 2- Calcule la fréquence propre du dipôle en appliquant la formule $N_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$
- 3- Fixe la fréquence N de la tension $u(t)$ aux bornes du GBF à la valeur de la fréquence propre N_0 calculée précédemment.
- 4- Observe à l'écran de l'oscilloscope les courbes de $u(t)$ et $u_R(t)$.
- 5- Ces courbes sont-elles en phase ?
- 6- Conclue.



Document 1 : Observation de la résonance d'intensité

Je fais le point de l'activité

1- Calcul de la fréquence propre du circuit

$$N_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0,8 \times 10^{-6}}}$$

$$N_0 = 178 \, \text{Hz}$$

2- Observations

À l'écran de l'oscilloscope, on visualise deux courbes qui atteignent leurs maximums et leurs minimums en même temps. On dit que les grandeurs $u(t)$ et $i(t)$ (représentée par $u_R(t)$) sont en phase.

3- Conclusion

Lorsque la fréquence N du générateur est égale à la fréquence propre N_0 du circuit RLC, la tension aux bornes du générateur ou du circuit RLC et l'intensité du courant électrique qui le traverse sont en phase : c'est la résonance d'intensité.

À la résonance d'intensité :

- $N = N_0$ (ou pulsation ω du courant du GBF est égale à la pulsation propre ω_0 du dipôle) ;
- les courbes de $u(t)$ et $i(t)$ sont en phase, donc la différence de phase $\varphi_{u/i} = 0$.
- $\tan \varphi_{u/i} = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R} = 0$, par conséquent $L\omega - \frac{1}{C\omega} = 0$, soit $LC\omega_0^2 = 1$;
- $\cos \varphi_{u/i} = \frac{R+r}{Z} = 1$, par conséquent et $Z = R + r$.



Un générateur (GBF) délivrant une tension sinusoïdale alimente en série, un conducteur ohmique de résistance $R = 1 \text{ k}\Omega$, un condensateur de capacité $C = 0,47 \text{ }\mu\text{F}$ et une bobine d'inductance L et de résistance interne r inconnues. Un oscillographe bicourbe est raccordé comme l'indique le schéma de la figure 1 ci-après.

- 1- Nomme les grandeurs électriques visualisées sur les voies A et B.
- 2- On fait varier la fréquence f du générateur jusqu'à obtenir l'oscillogramme de la figure 2.

2-1. Nomme le phénomène observé.

2-2. Donne deux caractéristiques de ce phénomène.

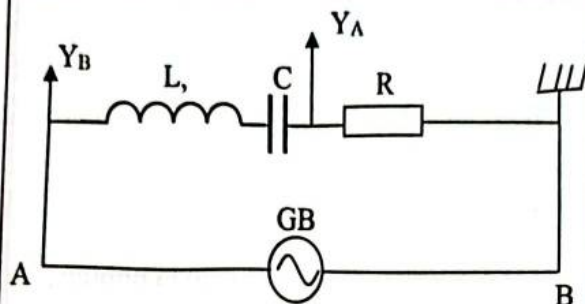


Figure 1

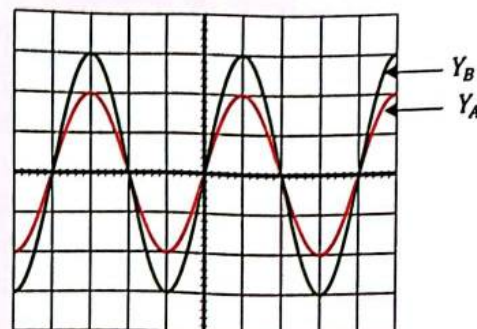
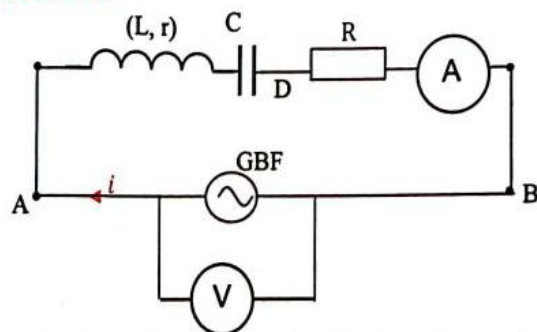


Figure 2

ACTIVITÉ 2 : TRACER LA COURBE DE RÉSONANCE D'INTENSITÉ

- 1- Réalise le montage expérimental du document 2 :
 $R = 120 \text{ }\Omega$; $r = 5 \text{ }\Omega$; $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$; $L = 0,8 \text{ H}$.
 - 2- Fixe la tension efficace U égale à 1 V aux bornes du GBF et fais varier la fréquence N du GBF.
- Pour différentes valeurs de N , relève les valeurs de l'intensité efficace I mesurées par l'ampèremètre, dans un tableau en gardant toujours la valeur $U = 1 \text{ V}$.
- 4- Trace la courbe $I = f(N)$ appelée courbe de résonance.

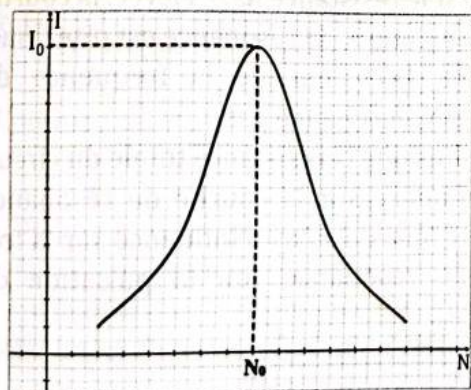
- 5- Exploite cette courbe.
- Je fais le point de l'activité



Document 2 : Schéma d'un circuit RLC pour la mesure de l'intensité efficace du courant

1- Tableau des valeurs de l'intensité efficace du courant I en fonction de la fréquence et tracé de la courbe

N(Hz)	100	160	180	185	190	196	198	200	202	206	210	220	260	300	350	400
I(mA)	16	50	90	107	126	145	149	150	149	141	128	96	43	28	20	16



Courbe de résonance $I = f(N)$

2- Exploitation de la courbe

L'intensité du courant électrique croît jusqu'à une valeur N_0 de la fréquence, puis elle décroît.

La courbe présente un maximum pour la valeur de la fréquence voisine de la fréquence propre N_0 du dipôle.

$N_0 = 200 \text{ Hz}$

Lorsque la fréquence du générateur est égale à la fréquence propre du circuit, celui-ci est à la résonance d'intensité. L'intensité efficace du courant qui traverse le circuit à la résonance, notée I_0 , est alors maximale car

$$Z = \sum R \text{ est minimale et } I_0 = \frac{U_{\text{fixée}}}{\sum R}.$$

J'évalue mes acquis



On associe en série, une bobine d'inductance L et de résistance r inconnues, un condensateur de capacité $C = 5,3 \mu F$, un interrupteur, un ampèremètre, des fils de connexion et un générateur de basses fréquences délivrant à ses bornes une tension sinusoïdale d'expression $u(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi)$ où φ est la différence de phase entre la tension et l'intensité du courant dans le circuit.

1- Fais le schéma du montage.

2- On impose une tension efficace $U = 9,3 \text{ V}$ aux bornes du GBF et on fait varier la pulsation ω du courant dans le circuit. Les résultats des mesures sont consignés dans le tableau ci-dessous.

$\omega(\text{rad/s})$	1000	1100	1200	1250	1300	1325	1350	1375	1400	1450	1500	1600
$I(\text{mA})$	110	160	280	400	660	820	930	830	660	410	310	200

2-1. Trace la courbe $I = f(\omega)$. Échelles : $1 \text{ cm} \rightarrow 50 \text{ mA}$ et $1 \text{ cm} \rightarrow 50 \text{ rad/s}$.

2-2. Détermine :

2.2.1. la pulsation propre ω_0 du circuit et l'intensité du courant I_0 à la résonance ;

2.2.2. l'inductance L et la résistance interne r de la bobine ;

2.2.3. l'expression de la tension $u(t)$ aux bornes du GBF et celle du courant $i(t)$ dans le circuit à la résonance d'intensité.

ACTIVITÉ 3 : MONTRER L'INFLUENCE DE LA RÉSISTANCE TOTALE DU CIRCUIT SUR LA RÉSONANCE D'INTENSITÉ

1- Trace, sur un même graphique, les courbes de résonance, à partir de différents relevés de valeurs de I et de N pour :

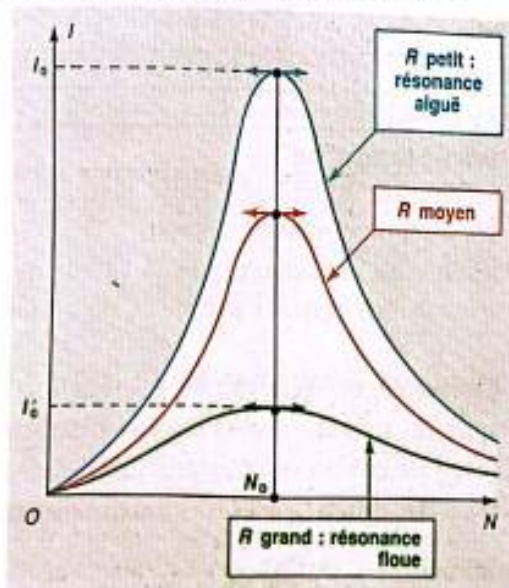
- une valeur moyenne de R_{totale} (quelques dizaines d'ohms) ;
- une faible valeur de R_{totale} (quelques ohms).
- une grande valeur de R_{totale} (une centaine ou quelques centaines d'ohms).

2- La résistance totale du circuit a-t-elle une influence sur :

- 2.1- la courbe de résonance d'intensité ?
2.2- la fréquence de résonance ?

Je fais le point de l'activité

1- Tracé des courbes de résonance :



2- Influence de la résistance du circuit

- Pour une résistance R_{totale} faible, la courbe est « pointue » : la résonance est dite aiguë.
- Pour une résistance R_{totale} élevée, la courbe est « aplatie » : la résonance est dite floue.

Cependant, la valeur de la fréquence de résonance N_0 ne change pas.

On en déduit que la résistance totale du circuit a une influence sur la courbe de résonance d'intensité, mais n'a pas d'influence sur la fréquence de résonance (ou la pulsation de résonance).

J'évalue mes acquis



Recopie et complète les phrases ci-dessous avec les mots qui conviennent.

1- La résonance d'intensité est dite aigüe lorsque la résistance totale du circuit est

.....

2- La résonance d'intensité est dite floue lorsque la résistance totale du circuit est

.....

ACTIVITÉ 4 : EXPLIQUER L'ACUITÉ DE LA RÉSONANCE D'INTENSITÉ

On peut évaluer la résonance d'intensité par la bande passante ou le facteur de qualité.

1- Reviens sur la courbe de l'activité 2 (courbe de résonance), détermine la bande de fréquences pour laquelle $I \geq \frac{I_0}{\sqrt{2}}$ et la largeur de cette bande (ΔN).

2- Le rapport $\frac{N_0}{\Delta N}$ ou $\frac{\omega_0}{\Delta \omega}$ est appelé facteur de qualité notée Q.

2.1- Trouve d'autres expressions de Q en fonction des caractéristiques du circuit.

2.2- Dis dans quel cas (Q petit ou grand) la résonance est aigüe ou floue.

Qualifie le circuit (sélectif ou peu sélectif) selon le cas.

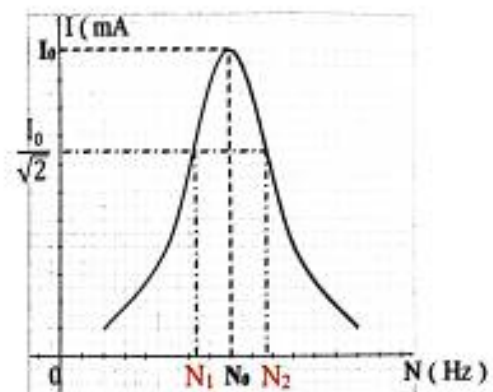
Je fais le point de l'activité

1- Détermination de la bande passante

Calculons $\frac{I_0}{\sqrt{2}}$ que l'on repère sur l'axe des ordonnées en exploitant l'échelle de construction.

Traçons l'horizontale d'ordonnée $\frac{I_0}{\sqrt{2}}$; elle coupe la courbe de résonance en deux points que l'on projette sur l'axe des abscisses. Il existe alors deux valeurs N_1 et N_2 ($N_1 < N_2$) dont l'intervalle est la bande de fréquences appelée bande passante.

La largeur de cette bande est $\Delta N = N_2 - N_1$.



2- Le facteur de qualité

• Le rapport $Q = \frac{N_0}{\Delta N} = \frac{\omega_0}{\Delta \omega}$, appelé facteur de qualité, définit la qualité de la résonance.

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta \omega} = \frac{N_0}{\Delta N} \text{ . Or } \Delta \omega = \frac{\Sigma R}{L} \text{ et } \Delta N = \frac{\Sigma R}{2\pi L}$$

$$\text{Donc } Q = \frac{L\omega_0}{\Sigma R} \text{ ou } Q = \frac{2\pi L N_0}{\Sigma R}$$

$$\text{Comme } L\omega_0 = \frac{1}{C\omega_0} \text{ à la résonance d'intensité, on a aussi } Q = \frac{1}{C\omega_0 \Sigma R} = \frac{1}{\Sigma R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

• Vu que la résonance est floue pour des résistances R élevées et aigüe pour des résistances R faibles, et que les expressions ci-dessus montrent que Q et R sont inversement proportionnels, on déduit que la résonance est floue pour Q faible.

Résonance floue pour $Q < 10$ et aigüe pour $Q > 10$.

Le circuit est peu sélectif pour Q faible et sélectif pour Q élevé.

J'évalue mes acquis



Exploitation de la courbe tracée à l'activité 2 « j'évalue mes acquis ».

- 1- Détermine la largeur de la bande passante $\Delta\omega$:
 - 1.1- graphiquement ;
 - 1.2- par calcul sachant que $R = 10\Omega$ et $L = 0,1\text{ H}$.
- 2- Compare ces valeurs et conclus.
- 3- Détermine le facteur de qualité Q graphiquement puis par calcul.
- 4- Compare ces valeurs.
- 5- Dis si le circuit est sélectif ou peu sélectif. Justifie ta réponse.

ACTIVITÉ 5 : EXPLIQUER LA SURTENSION À LA RÉSONANCE D'INTENSITÉ

Considère un circuit RLC.

- 1- Exprime, à la résonance d'intensité, la tension efficace U_c aux bornes du condensateur.
- 2- Compare U_c à U (tension efficace aux bornes du circuit).
- 3- Conclus.

Je fais le point de l'activité

1- Expressions de U_c à la résonance d'intensité

$$U_c = Z_c \times I_0 = \frac{1}{C\omega_0} \times \frac{U}{R}. \quad \text{Or } \frac{1}{R.C.\omega_0} = Q, \text{ donc } U_c = Q \times U$$

À la résonance d'intensité, $U_c = QU$

2- Surtension aux bornes du condensateur et de la bobine

$Q > 1$, alors $U_c > U$

On en déduit qu'il apparaît des surtensions aux bornes de la bobine et du condensateur à la résonance d'intensité.

Remarque : Pour une bobine de résistance négligeable $U_c \approx U_L = QU$.

Les grandes valeurs de U_L n'ont pas en général d'inconvénient pour la bobine mais si U_c devient trop grand, il y'a danger de claquage du condensateur.

J'évalue mes acquis



Un circuit résonant comporte en série un GBF dont la tension efficace à ses bornes est maintenue constante à $U = 9\text{ V}$, un conducteur ohmique de résistance $R = 90\Omega$, un condensateur de capacité $C = 2,2\mu\text{F}$, une bobine d'inductance $L = 100\text{ mH}$ et de résistance interne négligeable. La fréquence a pour valeur $N_0 = 340\text{ Hz}$.

L'intensité efficace à la résonance est $I_0 = 100\text{ mA}$.

- 1- Détermine les tensions efficaces U_c et U_L .
- 2- Compare les tensions efficaces U_c et U_L à la tension U aux bornes du générateur.
- 3- Conclus.

ACTIVITÉ 6 : DÉCOUVRIR QUELQUES APPLICATIONS DE LA RÉSONANCE D'INTENSITÉ

Recherche des applications de la résonance en mécanique, en électronique et en acoustique.

Je fais le point de l'activité**• En mécanique**

La résonance mécanique se caractérise par l'augmentation de l'amplitude des oscillations d'un système physique lorsque celui-ci est excité au voisinage de l'une de ses fréquences propres. Pour le cas d'un pendule simple.

L'exemple le plus simple est probablement celui d'un pendule ou d'une balançoire. Le mouvement de balancement ne peut s'amplifier que si on pousse la balançoire à intervalles réguliers correspondant à sa fréquence. C'est ainsi qu'elle peut absorber de l'énergie.

• En électronique

Le phénomène de résonance trouve des applications utiles dans la pratique, en particulier dans l'ingénierie radio. Cependant, si elle survient spontanément, elle peut conduire à des modes d'urgence en raison de l'apparition de fortes surtensions et surintensités. L'essence physique de la résonance réside dans l'échange périodique d'énergie entre le champ magnétique de l'inducteur et le champ électrique du condensateur, et la somme des énergies des champs reste constante.

• En acoustique

La résonance acoustique est la tendance d'un système acoustique à absorber plus d'énergie quand la fréquence de ses oscillations arrive à sa fréquence naturelle de vibration (sa fréquence de résonance), donc plus qu'il ne le fait à d'autres fréquences.

Un objet résonant aura probablement plus d'une fréquence de résonance, particulièrement aux harmoniques de la résonance la plus forte. Il vibrera facilement à ces fréquences, et moins fortement à d'autres fréquences. Il "sélectionnera" sa fréquence de résonance à partir d'une excitation complexe, telle qu'une impulsion ou une excitation de bruit à large bande. En fait, il filtre toutes les fréquences en dehors de sa résonance.

La résonance acoustique a une considération importante pour les constructeurs d'instruments de musique, car la plupart des instruments acoustiques emploient des résonateurs, tels que les cordes et le corps d'un violon, la longueur du tube d'une flûte, et la forme d'une membrane de tambour.

J'évalue mes acquis

Cite une application de la résonance en mécanique, en électronique et en acoustique.

II- RÉSUMÉ DE COURS

- La courbe de résonance traduit la variation de l'intensité efficace I dans le circuit en fonction de la fréquence N lorsque la valeur efficace U de la tension d'alimentation reste constante.
- A la résonance d'intensité, l'intensité efficace est maximale et notée I_0 . $I_0 = \frac{U_{\text{fixée}}}{\sum R}$.
- Le phénomène de résonance d'intensité se produit lorsque la fréquence N de la tension appliquée est égale à la fréquence propre N_0 du circuit. $N = N_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$
- A la résonance d'intensité, l'impédance du circuit est minimale et égale à sa résistance totale.

$$Z = \sum R = \frac{U_{\text{fixée}}}{I_0}$$

- A la résonance d'intensité, l'intensité i est en phase avec la tension u appliquée. $\varphi = 0$ rad
- A la résonance d'intensité, l'effet de l'inductance compense exactement celui de la capacité :

$$U_i = U_c \text{ ou } Z_i = Z_c, \text{ ce qui implique que } L\omega_0 = \frac{1}{C\omega_0}, \text{ soit } LC\omega_0^2 = 1$$

- La bande passante d'un circuit (R, L, C) désigne l'ensemble des fréquences comprises entre N_1 et N_2 telles que $I \geq \frac{I_0}{\sqrt{2}}$. $\Delta N = N_2 - N_1$

$$\text{La largeur de la bande passante est } \Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = \frac{\Sigma R}{L} \text{ ou } \Delta N = N_2 - N_1 = \frac{\Sigma R}{2\pi L}$$

- Le facteur de qualité est le quotient du rapport de la fréquence de résonance (ou pulsation de résonance) par la largeur de la bande passante.

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{N_0}{\Delta N} ; \quad Q = \frac{L\omega_0}{\Sigma R} ; \quad Q = \frac{2\pi L N_0}{\Sigma R} ; \quad Q = \frac{1}{C\omega_0 \Sigma R} = \frac{1}{\Sigma R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Si R est faible, Q est grand ($Q > 10$) ; le circuit est sélectif et la résonance est aiguë.

Si R est élevée, Q est petit ($Q < 10$) ; le circuit est peu sélectif et la résonance est floue.

- A la résonance d'intensité, $U_c = Q.U$.

$U_c > U$: il y'a surtension aux bornes du condensateur.

III- MÉTHODES

- Pour étudier la résonance d'intensité, il faut maintenir constante la tension efficace de la tension aux bornes du GBF et faire varier la pulsation ou la fréquence.

Les oscillogrammes de la tension aux bornes du dipôle RLC et de l'intensité sont deux sinusoïdes en phase.

- Dans le tableau de valeurs (ω ou N , I), la plus grande valeur de I est l'intensité efficace à la résonance (I_0) et la fréquence correspondante est la fréquence de résonance (N_0).
- La connaissance de :

* I_0 et la tension constante U permet de calculer la valeur d'une résistance inconnue à partir de la relation $I_0 = \frac{U_{fixée}}{\Sigma R}$.

* ω_0 ou N_0 et de L ou C permet de calculer la valeur de L ou C à partir de la relation $L.C\omega_0^2 = 1$

- Pour déterminer graphiquement la largeur de la bande passante, il faut :

* calculer la valeur de $\frac{I_0}{\sqrt{2}}$ et la repérer sur l'axe de I en exploitant l'échelle,

* tracer l'horizontale passant par $\frac{I_0}{\sqrt{2}}$. Cette horizontale coupe la courbe en deux points qu'on projette sur l'axe des abscisses pour retrouver N_1 et N_2 (ou ω_1 et ω_2).

La largeur de la bande passante peut être déterminée en mesurant le segment délimité par N_1 et N_2 et calculer la valeur de fréquence correspondant à cette mesure à l'aide de l'échelle de construction.

IV - EXERCICES RÉSOLUS

Exercice 1

Un circuit électrique comprend, associés en série, un conducteur ohmique de résistance $R = 40 \, \Omega$, une bobine d'inductance $L = 0,13 \, \text{H}$ et de résistance négligeable et un condensateur de capacité C inconnue. Ce circuit est alimenté par un générateur délivrant une tension sinusoïdale $u(t)$ de fréquence variable et de valeur efficace constante $U = 1 \, \text{V}$. On fait varier la fréquence du générateur et on constate que l'intensité du courant est maximale pour une fréquence $N_0 = 600 \, \text{Hz}$.

- 1- Nomme le phénomène ainsi mis en évidence.
- 2- Donne la valeur de l'impédance totale du circuit dans ce cas.
- 3- Détermine :
 - 3.1- la valeur efficace I_0 de l'intensité du courant qui traverse le circuit dans ce cas ;
 - 3.2- la capacité C du condensateur.

Exercice 2

Une bobine d'inductance $L = 250 \, \text{mH}$ et de résistance $R = 37 \, \Omega$ est branchée en série avec un condensateur de capacité $C = 3,2 \, \mu\text{F}$. On alimente le dipôle ainsi constitué par un générateur de basses fréquences (G.B.F) dont la fréquence est réglée sur $N = 100 \, \text{Hz}$.

- 1- Détermine la fréquence propre N_0 du circuit (R, L, C) série réalisé.
- 2- Dis si le circuit est résonant lorsque la fréquence est réglée sur $N = 100 \, \text{Hz}$.
- 3- Détermine le facteur de qualité Q et la largeur de la bande passante ΔN du circuit lorsque la fréquence du GBF est réglée sur la fréquence $N' = 178 \, \text{Hz}$.
- 4- Dis si le circuit est sélectif ou peu sélectif. Justifie ta réponse.

Exercice 3

Un dipôle électrique est constitué d'un condensateur de capacité $C = 0,5 \, \mu\text{F}$ et d'une bobine de résistance $r = 15 \, \Omega$ et d'inductance $L = 0,65 \, \text{H}$, disposés en série. Ce dipôle est alimenté par un générateur de basses fréquences délivrant une tension de valeur efficace $U = 6 \, \text{V}$.

- 1- Détermine la pulsation ω du courant qui impose au circuit une impédance Z minimale.
- 2- Détermine la largeur de la bande passante $\Delta\omega$.
- 3- Dédus des réponses des questions 1 et 3, le facteur de qualité Q .
- 4- Dédus :
 - 4.1- l'acuité de la résonance. Justifie ta réponse ;
 - 4.2- la tension efficace aux bornes du condensateur.

Résolution de l'exercice 1

- 1- La résonance d'intensité.
- 2- $Z = R = 40 \, \Omega$.
- 3-

$$3.1- I_0 = \frac{U}{R} = \frac{1}{40} = 0,025 \, \text{A}.$$

$$3.2- LC\omega_0^2 = 1 \text{ avec } \omega_0 = 2\pi N_0 ; C = \frac{1}{4\pi^2 L N_0^2} = 0,54 \cdot 10^{-6} \, \text{F} \text{ soit } 0,54 \, \mu\text{F}$$

Commentaire :

- Identifier dans le corps de l'énoncé des expressions qui se réfèrent à la résonance d'intensité.

Exemples : la valeur de la tension efficace constante ; l'intensité efficace est maximale.

- Connaître les grandeurs physiques qui caractérisent la résonance d'intensité.

Exemples : $Z = \sum R$; $I_0 = \frac{U_{\text{efficace}}}{\sum R}$; $LC\omega_0^2 = 1$ avec $\omega_0 = 2\pi N_0$

Résonance d'intensité d'un circuit RLC série

Résolution de l'exercice 2

1-

$$1.1- N_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0,25 \times 3,2 \cdot 10^{-6}}} \\ N_0 = 178 \text{ Hz}$$

1.2- Le circuit n'est pas résonant car $N = 100 \text{ Hz}$ est différent de N_0 .

$$2- \text{Le facteur de qualité : } Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} ; \quad Q = \frac{1}{37} \sqrt{\frac{0,25}{3,2 \cdot 10^{-6}}} ; \quad Q = 7,5.$$

$$\text{La largeur de la bande passante : } \Delta N = \frac{R}{2\pi L} ; \quad \Delta N = \frac{37}{2\pi \times 0,25} ; \quad \Delta N = 23,5 \text{ Hz.}$$

3- Le circuit est peu sélectif car $Q < 10$.

Commentaire :

- Connaître l'expression de la fréquence propre d'un circuit série (R, L, C) : $N_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$
- Savoir qu'à la résonance d'intensité, la fréquence du GBF est $N = N_0$.
- Connaître les expressions : $Q = \frac{2\pi L N_0}{R}$; $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ (la 2^e est déduite de la 1^{re} en remplaçant N_0 par $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$)
- Connaître les expressions : $\Delta N = N_2 - N_1 = \frac{R}{2\pi L}$; $Q = \frac{N_0}{\Delta N}$; $\Delta N = \frac{N_0}{Q}$
- Savoir que :
si R est faible, Q est grand ($Q > 10$) ainsi le circuit est sélectif et la résonance est aiguë ;
si R est élevée, Q est petit ($Q < 10$) ainsi le circuit est peu sélectif et la résonance est floue.

Résolution de l'exercice 3

$$1- \text{La pulsation } \omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{0,65 \times 0,5 \cdot 10^{-6}}} = 1754 \text{ rad.s}^{-1}.$$

$$2- \text{La largeur de la bande passante : } \Delta\omega = \frac{r}{L} = 23 \text{ rad.s}^{-1}.$$

$$3- \text{La valeur du facteur de qualité : } Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{1754}{23} = 76,26$$

4-

4.1- La résonance est aiguë car $Q > 10$.

$$4.2- \text{La tension efficace aux bornes du condensateur : } U_C = Q \times U = 457,56 \text{ V.}$$

Commentaire :

- Savoir que Z est minimale à la résonance d'intensité ainsi $N = N_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$
- savoir faire le schéma de montage qui comporte un ampèremètre et un voltmètre monté aux bornes du GBF.
- Connaître la relation : $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = \frac{R}{L}$
- Connaître les relations : $Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega}$ et $U_C = Q \times U$

V- JE M'EXERCE

Exercices de fixation/ Application

1 Une série d'expressions des grandeurs physiques relatives au circuit RLC série t'est proposé (e).

1- A la résonance d'intensité, la phase $\varphi_{u/i}$ a pour valeur :

a) $\varphi_{u/i} = \frac{\pi}{2}$ rad ; b) $\varphi_{u/i} = \pi$ rad ;

c) $\varphi_{u/i} = 0$ rad ; d) $\varphi_{u/i} = \frac{\pi}{2}$ rad.

2- A la résonance d'intensité, la fréquence de résonance a pour expression :

a) $N_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{LC}}$; b) $N_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

c) $N_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ d) $N_0 = \frac{\pi}{\sqrt{LC}}$

3- La bande passante a pour expression :

a) $\Delta\omega = \frac{\Sigma R}{L}$; b) $\Delta\omega = \frac{L}{\Sigma R}$;

c) $\Delta\omega = \frac{2\pi L}{\Sigma R}$; d) $\Delta\omega = \frac{\Sigma R}{LC}$.

4- Le facteur de qualité Q a pour expression :

a) $Q = \frac{L}{\Sigma R}$; b) $Q = \frac{2\pi L}{\Sigma R}$;

c) $Q = \frac{\Sigma R}{2\pi L N_0}$; d) $Q = \frac{L\omega_0}{\Sigma R}$.

Recopie le numéro suivi de la lettre correspondant à la bonne réponse dans chaque cas.

2 Recopie les phrases ci-dessous en les complétant avec les mots et l'expression qui conviennent.

1- La bande passante est le domaine des fréquences pour lesquelles l'intensité efficace est supérieure ou égale à

2- Lorsque le facteur de qualité est supérieur à 10, la résonance est dite et le circuit est

3 Recopie le numéro de chacune des affirmations ci-dessous, puis écris la lettre V si l'affirmation est vraie ou la lettre F si elle est fausse.

1- L'intensité efficace, à la résonance d'intensité,

est minimale.

2- La fréquence de résonance est plus élevée lorsqu'on utilise des condensateurs de capacités plus petites.

3- La bande passante est plus grande lorsque la résistance du circuit est élevée.

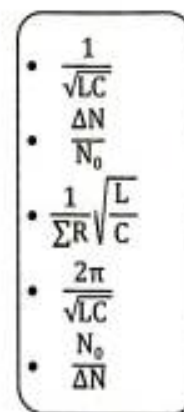
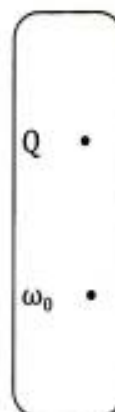
4- La résonance d'intensité est floue lorsque le facteur de qualité est élevé.

5- En radio électricité, il est nécessaire que la résonance soit aiguë pour qu'on n'entende pas plusieurs stations à la fois.

4 Ordonne les mots ou groupes de mots ci-dessous de manière à constituer une phrase ayant du sens.

à la / du circuit. / lorsque / La résonance / est atteinte / réglée égale / basses fréquences / du générateur de / la fréquence / d'intensité / est / fréquence propre

5 Reproduis les diagrammes puis relie par un trait, chaque grandeur du diagramme A à son expression ou ses expressions littérale(s) du diagramme B..



6 Un circuit résonant comporte un GBF dont la tension efficace à ses bornes est maintenue constante à $U = 9$ V, un conducteur ohmique de résistance $R = 60 \Omega$, un condensateur de capacité $C = 60$ nF, une bobine d'inductance $L = 100$ mH et de résistance interne r inconnue. L'intensité efficace à la résonance est $I_0 = 100$ mA.

- 1- L'impédance Z du circuit a pour valeur :
a) 60Ω ; b) 30Ω ; c) 90Ω ; d) 100Ω .
- 2- La résistance interne r de la bobine a pour valeur :
a) 60Ω ; b) 30Ω ; c) 90Ω ; d) 100Ω
- 3- La fréquence de résonance a pour valeur :

- a) 2055 Hz ; b) 2000 Hz ; c) 2050 Hz ;
d) 2045Ω .

- 4- Le facteur de qualité a pour valeur :
a) $14,3$; b) 134 ; c) 143 ; d) 140 .
Écris pour chacune des propositions, la lettre correspondante à la bonne option (exemple : 2.b)

Exercices de renforcement / Approfondissement

7 Un circuit comprend, associés en série, un conducteur ohmique de résistance $R = 40 \Omega$, une bobine d'inductance $L = 0,13 \text{ H}$ et de résistance négligeable et un condensateur de capacité C inconnue. Ce circuit est alimenté par un générateur délivrant une tension sinusoïdale $u(t) = U\sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi)$ de fréquence variable et de valeur efficace constante $U = 1 \text{ V}$.

On fait varier la fréquence du générateur et on constate que l'intensité du courant est maximale pour une pulsation $\omega_0 = 1200\pi \text{ rad.s}^{-1}$.

- 1- Écris la relation entre L , C et ω_0 .
- 2- Donne la valeur de l'impédance totale du circuit.
- 3- Détermine :
3.1- la valeur efficace I_0 de l'intensité du courant qui parcourt le circuit ;
3.2- la capacité C du condensateur.

8 On dispose d'une source de tension sinusoïdale de pulsation ω réglable dont la tension instantanée exprimée en volts est donnée par la formule : $u(t) = 12\sqrt{2} \sin(\omega t)$.

A l'aide de cette source on alimente un conducteur ohmique de résistance $R = 300 \Omega$, un condensateur de capacité $C = 25 \text{ nF}$, une bobine d'inductance $L = 0,4 \text{ H}$ et de résistance négligeable montés en série.

- 1- Détermine la valeur à laquelle on doit régler la pulsation pour que les courbes $u(t)$ et $i(t)$ soient en phase.
- 2- Détermine dans ces conditions :
2.1- l'intensité efficace I_0 du courant dans le circuit ;
2.2- les tensions efficaces U_C et U_L respectivement aux bornes du condensateur et de la bobine.
- 3- Calcule les rapports $\frac{U_L}{U}$ et $\frac{U_C}{U}$.
- 4- Nomme ce rapport et dis ce qu'il caractérise.

9 Un dipôle RLC série est soumis à une tension excitatrice de fréquence variable et d'amplitude

$10\sqrt{2} \text{ V}$.

- 1- Cite deux caractéristiques d'un circuit résonant.
- 2- Ce circuit est résonant pour une intensité efficace maximale de valeur $I_0 = 0,1 \text{ A}$ à la fréquence $N_0 = 100 \text{ Hz}$.
2.1- Écris la relation entre L , C et N_0 .
2.2- Déduis la valeur de la capacité C sachant que $L = 47 \text{ mH}$.
- 3- Détermine :
3.1- l'impédance Z du dipôle à la résonance d'intensité ;
3.2- le facteur de qualité Q du circuit ;
3.3- la caractéristique du circuit que l'on peut déduire de l'impédance.

10 On applique au circuit représenté sur la figure 1 une tension u_{AB} sinusoïdale de fréquence N en maintenant la valeur efficace de cette tension constante et égale à $0,95 \text{ V}$. La mesure de l'intensité efficace I , pour différentes valeurs de la fréquence N , permet de construire la courbe $I = f(N)$ (figure 2).

Figure 1

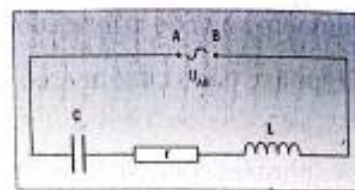
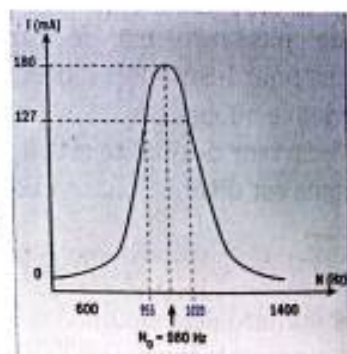


Figure 2



- 1- Détermine l'inductance L de la bobine et la résistance r du circuit en utilisant les données expérimentales sachant que $C = 2 \mu\text{F}$. (Tu prendras $\pi^2 = 10$.)

- 2- Calcule le facteur de qualité $Q = \frac{N_0}{\Delta N} = \frac{2\pi N_0 L}{r}$
- 3- Dis si le circuit est sélectif ou non.
- 4- Montre que ce facteur de qualité Q donne le rapport entre la tension aux bornes du condensateur et celle aux bornes du générateur à la résonance d'intensité.

11 Un circuit électrique comporte, disposés en série un générateur de basses fréquences GBF délivrant une tension sinusoïdale de fréquence N et de tension efficace U , un conducteur ohmique de résistance $R = 100 \Omega$, une bobine de résistance interne r et d'inductance $L = 0,2 \text{ H}$, un condensateur de capacité C et des fils de connexion.

L'expression de l'intensité instantanée du courant dans le circuit est $i(t) = I\sqrt{2} \cos(2\pi Nt)$; celle de la tension instantanée imposée par le générateur est $u(t) = U\sqrt{2} \cos(2\pi Nt + \varphi)$.

U et I sont des grandeurs efficaces directement lues respectivement sur un voltmètre et sur un ampèremètre.

La valeur efficace de la tension $u(t)$ aux bornes du générateur est maintenue constante à $U = 2,8 \text{ V}$ et on fait varier la fréquence N de la tension. On relève l'intensité efficace du courant en fonction de la fréquence N . Pour $N = 503 \text{ Hz}$, l'intensité efficace prend sa plus grande valeur $I_0 = 21,4 \text{ mA}$.

1- Détermine :

- 1.1- la capacité C du condensateur ;
- 1.2- la résistance totale R_T du circuit électrique ;
- 1.3- la résistance interne r de la bobine.

2- La tension aux bornes du générateur et l'intensité du courant sont en phase. La figure ci-après représente l'écran de l'oscilloscope affichant les tensions aux bornes du générateur et du conducteur ohmique.

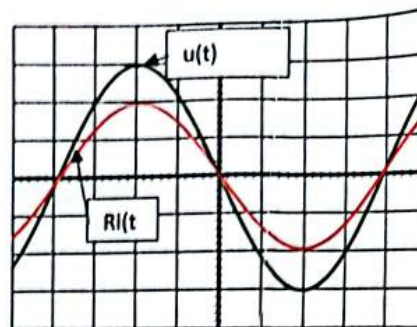
Donne la valeur de la différence de phase entre ces courbes.

3- Détermine :

- 3.1- la période T des signaux ;
- 3.2- la valeur maximale U_m de la tension aux bornes du générateur ;
- 3.3- la valeur maximale U_{Rm} de la tension aux bornes du résistor.

4- Détermine :

- 4.1- la sensibilité horizontale ;
- 4.2- la sensibilité verticale.



12 Un dipôle AM comprend en série un conducteur ohmique de résistance $R = 40 \Omega$, une bobine d'inductance L et de résistance r , un condensateur de capacité $C = 0,83 \mu\text{F}$ et des fils de connexion (figure a).

Ce dipôle est alimenté par un générateur qui délivre une tension alternative et sinusoïdale $u = u_{AM}$. On observe les tensions u_{AM} et u_{BM} avec un oscilloscope bicourbe (figure b).

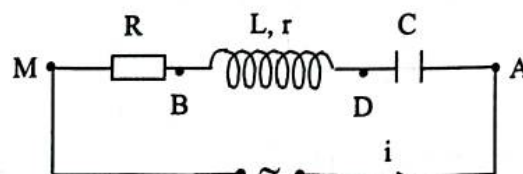


figure a

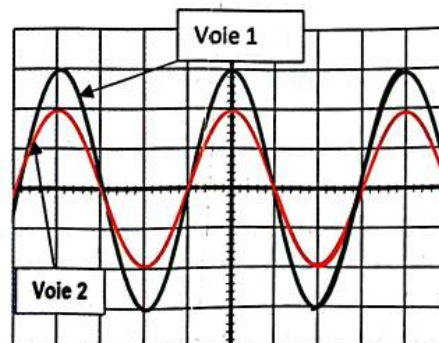


figure b

- Sensibilité sur les voies :

voie 1 : $0,2 \text{ V/division}$

voie 2 : 1 V/division

- Base des temps : $0,05 \text{ ms/division}$

1- Rappelle la relation qui lie U_m , Z et I_m .

2- Détermine graphiquement :

2.1- les valeurs maximales U_{AMmax} et U_{BMmax} des tensions visualisées ;

2.2- la pulsation propre ω_0 du circuit.

3- Dédus de 1. et de 2.1, la courbe visualisée sur la voie 1 ; sur la voie 2. Justifie ta réponse.

4- Détermine graphiquement la valeur maximale I_{max} de l'intensité i du courant.

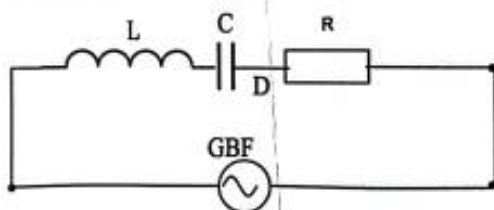
5- Reproduis la figure a et complète-la avec les voies 1 et 2.

6- Détermine les valeurs de r et L .

Situations d'évaluation

13 Dans le cadre des activités du club de Physique-Chimie de ton lycée, ton encadreur te propose le circuit électrique série ci-dessous en vue de déterminer des grandeurs relatives à un phénomène électrique étudié en classe. Ce circuit comporte un générateur basses fréquences (GBF) délivrant une tension sinusoïdale, un conducteur ohmique de résistance R , une bobine d'inductance L de résistance interne nulle, un condensateur de capacité C et des fils de connexion.

La tension efficace aux bornes du GBF est maintenue à 12 V ; on fait varier la fréquence de cette tension et on relève les valeurs correspondantes de l'intensité efficace I du courant. Lorsqu'on représente les variations de l'intensité efficace I du courant en fonction de la fréquence N , la courbe obtenue passe par un maximum pour une valeur particulière N_0 de la fréquence.



Données :

$R = 250 \, \Omega$; $L = 450 \, \text{mH}$; $C = 1,6 \, \mu\text{F}$

Échelle : 1 cm pour 5 V.

- 1- Reproduis le schéma du montage et représente les voies A et B d'un oscilloscope bicourbe permettant de visualiser simultanément sur son écran respectivement les variations de la tension $u(t)$ aux bornes du GBF et celles de la tension $u_R(t)$.
- 2- Nomme le phénomène correspondant à la valeur particulière N_0 de la fréquence.
- 3- Détermine pour $N = N_0$:
 - 3.1- l'intensité efficace I_0 du courant ;
 - 3.2- les tensions efficaces U_{OR} , U_{OL} et U_{OC} respectivement aux bornes du conducteur ohmique, de la bobine et du condensateur.
- 4- Fais la construction de Fresnel relative à ce circuit.

14 Pour vérifier les acquis de ses élèves de la 1^{re} E sur la leçon « Résonance d'intensité d'un circuit (R, L, C) série », un professeur de Physique-Chimie organise une séance de travaux pratiques avec ceux-ci.

Il met à leur disposition un générateur de basses fréquences (GBF), un condensateur de capacité C , un conducteur ohmique de résistance R , une bobine d'inductance L et de résistance négligeable, un ampèremètre, un voltmètre et des fils de connexion.

Les élèves réalisent le montage et maintiennent constante la valeur efficace U de la tension aux bornes du GBF. Ils font varier la fréquence en fonction de l'intensité et établissent le tableau ci-dessous.

N(Hz)	2000	2100	2150	2200	2250	2275	2300	2325
I(mA)	22	32	42	57	84	102	120	130

N(Hz)	2350	2375	2400	2450	2500	2600	2700	2800
I(mA)	118	100	85	60	43	30	22	16

Données : $C = 0,5 \, \mu\text{F}$; $U = 0,9 \, \text{V}$.

Échelles : 1 cm pour 10 mA et 1 cm pour 50 Hz.
(Commence l'axe des fréquences par 2000 Hz)

Tu es de cette classe.

- 1- Trace la courbe $I = f(N)$.
- 2- Donne le nom du phénomène correspondant au maximum d'intensité observé sur la courbe.
- 3- Détermine graphiquement :
 - 3.1- la fréquence propre N_0 et l'intensité efficace I_0 du courant ;
 - 3.2- la largeur de la bande passante ΔN du circuit.
- 4- Détermine :
 - 4.1- le facteur de qualité Q du circuit ;
 - 4.2- l'impédance Z du circuit pour $N = N_0$;
 - 4.3- l'inductance L de la bobine ;
 - 4.4- la résistance R du conducteur ohmique.

15 Le Conseil d'Enseignement de Physique-Chimie de ton établissement organise une présélection des élèves de la Terminale C, candidats à un concours d'excellence. Il propose à cet effet, le schéma de montage (figure 1) et les oscillogrammes (figure 2).

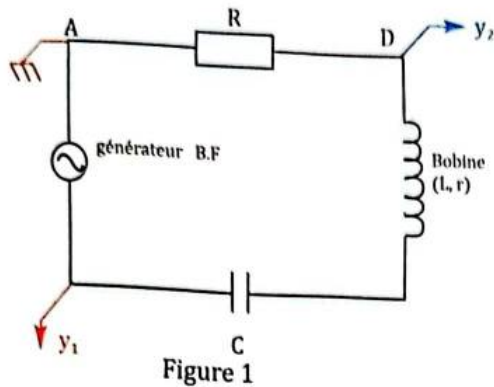


Figure 1

Données : $R = 10 \, \Omega$ et $C = 1 \, \mu\text{F}$

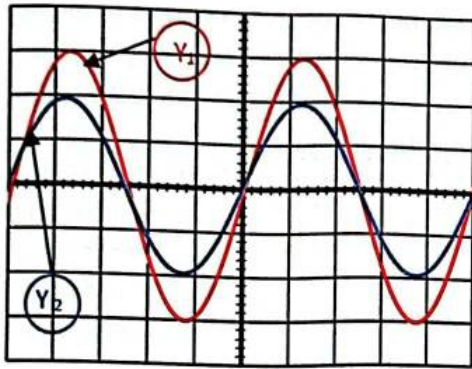


Figure 2

Sensibilité horizontale : voie 1 : $0,5 \, \text{V/div}$

Voie 2 : $1 \, \text{V/div}$

Sensibilité verticale : $0,5 \, \text{ms/div}$

Tu es candidat (e) à cette présélection.

1- Nomme :

1.1- les tensions visualisées sur chacune des voies de l'oscilloscope ;

1.2- le phénomène observé.

2- Détermine :

2.1- la fréquence N_0 de la tension appliquée ;

2.2- la tension efficace U de la tension délivrée par le générateur basses fréquences ;

2.3- l'intensité efficace I_0 du courant qui circule dans le circuit.

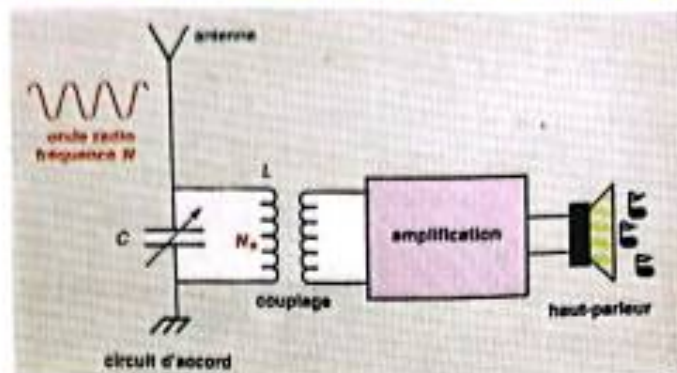
3- Déduis l'inductance L et la résistance interne r de la bobine.

4- Détermine :

4.1- le facteur de qualité Q du circuit ;

4.2- la tension maximale U_{Cmax} aux bornes du condensateur.

VI- RENDEZ-VOUS DES CURIEUX



C'est grâce au phénomène de résonance que l'on capte de manière sélective une station radiophonique ou une chaîne de télévision.

La figure ci-dessus schématise la chaîne électronique d'un récepteur de radio.

L'antenne capte les signaux électriques venant d'un très grand nombre de stations et il faut sélectionner ceux qui correspondent à la station désirée (fréquence N) ; c'est le circuit d'accord qui le permet. On modifie la valeur de la capacité C (capacité variable) du condensateur jusqu'à ce que la fréquence propre N_0 du circuit d'accord devienne voisine de N . Le circuit, très sélectif car R est très faible, ne « répond » pratiquement qu'aux sollicitations de fréquence N_0 (résonance très aiguë). Un couplage inductif envoie les signaux sinusoïdaux dans un système amplificateur et le haut-parleur transforme les vibrations électriques amplifiées en vibration mécanique d'une membrane ; il en résulte un son.

Il est aisément vérifiable que les circuits d'accord sont extrêmement sélectifs en ondes courtes (c'est-à-dire en haute fréquence, modulation de fréquence notamment) : il faut être vraiment sur la station pour la recevoir.

En revanche, en grandes ondes, les bandes passantes sont beaucoup plus larges (circuits d'accord peu sélectifs). Bien entendu, c'est toujours à la résonance que le transfert énergétique entre l'onde et le signal électrique dans l'antenne est le plus efficace.

Les antennes de télévision sont dites à large bande car le récepteur doit capter simultanément l'image et le son qui sont transmis dans des domaines de fréquences voisins mais sensiblement différents. Le circuit d'accord, très peu sélectif (résonance floue) reçoit donc les signaux intéressants mais également d'autres signaux de fréquences voisines qui le sont moins, en particulier des parasites.

Lorsqu'on change de chaîne, on modifie de façon importante la fréquence N_0 du circuit d'accord pour se placer à l'intérieur des domaines de fréquence d'un autre canal.

PUISSANCE EN COURANT ALTERNATIF

TABLEAU DES HABILETÉS ET DES CONTENUS

HABILETÉS	CONTENUS
Connaître	les expressions de: - la puissance instantanée ; - la puissance moyenne consommée par des dipôles idéaux (R, L, C) ; - la puissance moyenne consommée dans un dipôle R L C série.
Connaître	l'expression de l'énergie électrique échangée dans un dipôle RLC.
Définir	le facteur de puissance.
Déterminer	- le facteur de puissance. - la puissance moyenne.
Montrer	l'intérêt du facteur de puissance.
Expliquer	l'intérêt du transport du courant électrique sous haute tension.

NOTIONS ESSENTIELLES

- Puissance instantanée
- Puissance moyenne
- Énergie électrique
- Facteur de puissance
- Puissance moyenne
- Puissance apparente

SITUATION D'APPRENTISSAGE

Lors d'une sortie d'étude sur la production du courant électrique sur le barrage hydroélectrique de TAABO, des élèves de Tle D d'un lycée de la place remarquent que les lignes de distribution du courant entre le barrage et les utilisateurs sont jalonnées de transformateurs. Le guide leur explique que la présence de ces transformateurs permet de réduire les pertes d'énergie lors du transport de l'électricité. En classe, avec l'aide de leur professeur de Physique-Chimie, ils cherchent à connaître les expressions des différentes puissances, à expliquer l'intérêt du transport du courant électrique sous haute tension et à déterminer le facteur de puissance.



I- ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1 : DÉFINIR LA PUISSANCE INSTANTANÉE

Considère un dipôle récepteur alimenté sous une tension alternative et sinusoïdale $u = U\sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi)$, traversé par un courant d'intensité $i = I\sqrt{2} \cos \omega t$.

- 1- Rappelle l'expression de la puissance consommée par un appareil en courant continu.
- 2- Dédus l'expression de la puissance instantanée $\mathcal{P}(t)$.
- 3- Montre que la puissance instantanée $\mathcal{P}(t)$ a pour expression $UI [\cos(2\omega t + \varphi) + \cos \varphi]$.

Je fais le point de l'activité

1- Expression de la puissance en courant continu

La puissance électrique consommée par un dipôle en courant continu a pour expression :

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

$\mathcal{P}$ en watt (W) ; U en volts (V) et I en ampères (A).

2- Expressions de la puissance en courant alternatif

En courant alternatif, la puissance instantanée $\mathcal{P}$ consommée par un récepteur est égale au produit des valeurs instantanées de la tension u entre ses bornes et de l'intensité $i(t)$ du courant qui le traverse.

$$\mathcal{P} = u(t).i(t) = u.i$$

Soit $u(t) = U\sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi)$ et $i(t) = I\sqrt{2} \cos \omega t$.

En remplaçant $u(t)$ et $i(t)$ par leurs expressions ci-dessus dans l'expression de la puissance, on obtient :

$$\mathcal{P} = U\sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi) \times I\sqrt{2} \cos \omega t = 2 UI \cos(\omega t + \varphi) \times \cos \omega t.$$

$$\text{Or } \cos(\omega t + \varphi) \times \cos \omega t = \frac{1}{2} [\cos(\omega t + \varphi - \omega t) + \cos(\omega t + \varphi + \omega t)].$$

$$\text{Ce qui donne } \mathcal{P} = 2 UI \times \frac{1}{2} [\cos \varphi + \cos(2\omega t + \varphi)].$$

Donc : $\mathcal{P} = UI [\cos(2\omega t + \varphi) + \cos \varphi]$, avec :

- U et I , les valeurs efficaces respectivement de la tension $u(t)$ et de l'intensité $i(t)$ du courant électrique ;
- ω en rad/s, la pulsation de la tension $u(t)$;
- φ en rad, la phase de $u(t)$ par rapport à $i(t)$.

J'évalue mes acquis



La puissance instantanée $\mathcal{P}$ consommée par un dipôle est égale au produit de la tension u entre ses bornes par l'intensité i du courant qui le traverse.

Son expression est :

- a) $\mathcal{P} = UI [\cos(\omega t + \varphi) + \cos \varphi]$;
- b) $\mathcal{P} = UI [\cos(2\omega t) + \cos \varphi]$;
- c) $\mathcal{P} = UI [\cos(2\omega t + \varphi) + \cos \varphi]$;
- d) $\mathcal{P} = UI [\cos 2(\omega t + \varphi) + \cos \varphi]$.

Choisis la bonne option.

ACTIVITÉ 2 : ÉTABLIR L'EXPRESSION DE LA PUISSANCE MOYENNE ET DE L'ÉNERGIE CONSOMMÉE PAR UN DIPÔLE

Un dipôle récepteur alimenté sous une tension alternative sinusoïdale $u = U\sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi)$ est traversé par un courant d'intensité $i = I\sqrt{2} \cos \omega t$.

- 1- Donne l'expression de l'énergie élémentaire dE consommée par ce dipôle pendant un durée élémentaire dt .

2. Montre que l'énergie moyenne consommée par ce dipôle pendant une période T est $E = UI \cos \varphi T$
3. Dédus l'expression de la puissance moyenne consommée par ce dipôle.

Je fais le point de l'activité

• L'énergie élémentaire consommée par un dipôle pendant une durée élémentaire dt est :
 $dE = \mathcal{P} \cdot dt$; avec $\mathcal{P} = UI [\cos(2\omega t + \varphi) + \cos \varphi]$

• L'énergie moyenne consommée par un dipôle sur une période T est :

$$E = \int_0^T \mathcal{P} dt = \int_0^T UI [\cos(2\omega t + \varphi) + \cos \varphi] dt = UI \int_0^T \cos(2\omega t + \varphi) dt + UI \int_0^T \cos \varphi dt$$

Or $\int_0^T \cos(2\omega t + \varphi) dt = 0$ et $\int_0^T \cos \varphi dt = \cos \varphi \int_0^T dt = T \cos \varphi$.

On a donc : $E = UI T \cos \varphi$.

• La puissance moyenne consommée par un dipôle sur une période T est donc :

$$\mathcal{P} = \frac{E}{T} = UI \cos \varphi$$

- $\mathcal{P}$ est la puissance active, en watt (W).
- UI est la puissance apparente, en volt-ampère (VA).
- φ est la phase de la tension par rapport à l'intensité, en radian (rad).
- $\cos \varphi$ est le facteur de puissance.

• L'énergie consommée par un dipôle pendant une durée Δt est :

$$E = \mathcal{P} \cdot \Delta t = UI \Delta t \cos \varphi$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}, \text{ donc } E = UI \frac{R}{Z} \Delta t = UI \frac{R \times I}{U} \Delta t.$$

$$\text{D'où } \mathcal{P} \Delta t = RI^2 \Delta t$$

L'intégralité de l'énergie électrique reçue par un dipôle RLC est transformée en chaleur à travers la résistance R par effet Joule.

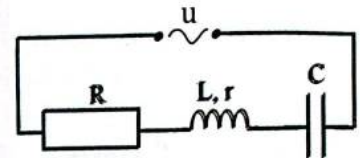
J'évalue mes acquis



Un dipôle RLC série alimenté par une tension alternative et sinusoïdale est traversé par un courant électrique.

Données : $U = 12 \text{ V}$; $I = 0,5 \text{ A}$; $\cos \varphi = 0,85$; $R = 20 \Omega$

- 1- Détermine la puissance moyenne $\mathcal{P}$ consommée par le dipôle RLC série.
- 2- Montre que la puissance moyenne $\mathcal{P}$ consommée par le dipôle RLC série s'écrit : $\mathcal{P} = RI^2$.



ACTIVITÉ 3 : ÉTABLIR LES EXPRESSIONS DES PUISSANCES MOYENNES CONSOMMÉES PAR UN CONDUCTEUR OHMIQUE, UN CONDENSATEUR ET UNE BOBINE

Considère un conducteur ohmique de résistance R , un condensateur de capacité C et une bobine d'inductance L et de résistance interne nulle.

Chacun de ces dipôles est alimenté par une tension alternative et sinusoïdale.

- 1- Établis l'expression de la puissance consommée par chaque dipôle.
- 2- Dédus la puissance moyenne consommée par un dipôle RLC série.

Je fais le point de l'activité

La puissance moyenne consommée par un dipôle RLC a pour expression : $\mathcal{P} = UI \cos \varphi$.

• Pour un conducteur ohmique de résistance R :

$\varphi = 0$ et $\cos \varphi = 1$; donc $\mathcal{P}_R = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R}$; la puissance consommée est égale à la puissance apparente.

• Pour un condensateur de capacité C :

$\varphi = -\frac{\pi}{2}$ rad et $\cos(-\frac{\pi}{2}) = 0$; donc $\mathcal{P}_C = 0$.

• Pour une bobine d'inductance L et résistance interne nulle :

$\varphi = \frac{\pi}{2}$ rad et $\cos(\frac{\pi}{2}) = 0$; donc $\mathcal{P}_L = 0$.

La puissance moyenne consommée par un dipôle RLC série est : $\mathcal{P} = RI^2$.

J'évalue mes acquis



Un conducteur ohmique de résistance $R = 18 \, \Omega$ est parcouru par un courant électrique d'intensité efficace $I = 2 \, \text{A}$.
Détermine la puissance consommée par le conducteur ohmique.

ACTIVITÉ 4 : MONTRER L'INFLUENCE DU FACTEUR DE PUISSANCE SUR LES PERTES D'ÉNERGIE PAR EFFET JOULE

Soit une installation domestique branchée entre deux points d'une ligne appartenant à un réseau de distribution de l'énergie électrique.

- 1- Exprime l'intensité efficace I du courant électrique parcourant la ligne.
- 2- Dégage l'influence du facteur de puissance sur les pertes d'énergie par effet Joule.

Je fais le point de l'activité

1- Expression de l'intensité du courant dans la ligne

- Soit $\mathcal{P}$ la puissance électrique consommée par l'installation : $\mathcal{P} = UI \cos \varphi$
- L'intensité du courant qui circule dans la ligne est : $I = \frac{\mathcal{P}}{U \cos \varphi}$.

2- Influence du facteur de puissance sur les pertes d'énergie par effet Joule

- Lorsque le facteur de puissance $\cos \varphi$ est élevé, l'intensité du courant qui circule dans la ligne est faible.
- Si on assimile la ligne à un conducteur ohmique de résistance r , la puissance moyenne perdue par effet Joule est $\mathcal{P}_r = rI^2 = r \frac{\mathcal{P}^2}{U^2 \cos^2 \varphi}$.
- Les pertes par effet Joule sont minimales lorsque le facteur de puissance est élevé.
- Comme l'effet Joule dans la ligne est proportionnel au carré de l'intensité efficace et constitue un gaspillage d'énergie, il faut que le facteur de puissance soit proche de 1 pour minimiser les pertes d'énergie dans les lignes par effet Joule.
- Pour augmenter le facteur de puissance, il faut installer des condensateurs de couplage sur les lignes pour réduire l'effet inductif dû aux bobinages dans les moteurs.

J'évalue mes acquis



Tu as ci-dessous un tableau qui résume les informations des installations électriques de deux domiciles A et B.

Domicile A	Domicile B
- Puissance souscrite : 1,1 kW	- Puissance souscrite : 1,1 kW
- Tension efficace : 220 V	- Tension efficace : 220 V
- Résistance totale : 200 Ω	- Résistance totale : 200 Ω
- Facteur de puissance : $\cos\varphi = 0,6$	- Facteur de puissance : $\cos\varphi = 0,85$

- 1- Détermine pour chaque installation :
 - 1.1- l'intensité efficace I du courant qui peut circuler ;
 - 1.2- la puissance électrique perdue par effet Joule.
- 2- Compare les pertes d'énergie par effet Joule dans les deux cas.

ACTIVITÉ 5 : MONTRER L'INTÉRÊT DU TRANSPORT DU COURANT ÉLECTRIQUE SOUS HAUTE TENSION

Une installation électrique consomme une puissance moyenne $\mathcal{P}$ sous une tension efficace U .

- 1- Exprime l'intensité efficace I en fonction de $\mathcal{P}$, U et $\cos\varphi$.
- 2- Dédus l'intérêt du transport de l'électricité sous haute tension.

Je fais le point de l'activité

1- Expression de l'intensité efficace en fonction de $\mathcal{P}$, U et $\cos\varphi$

La puissance moyenne consommée par une installation est : $\mathcal{P} = UI\cos\varphi$.

De cette relation, on a : $I = \frac{\mathcal{P}}{U\cos\varphi}$.

2- Intérêt du transport de l'électricité sous haute tension

Rappelons que la puissance joule a pour expression $\mathcal{P}_r = rI^2$.

En remplaçant I par son expression précédente, on obtient $\mathcal{P}_r = r \frac{\mathcal{P}^2}{U^2\cos^2\varphi}$.

Pour réduire ou minimiser les pertes par effet Joule dans les lignes, la tension efficace doit être élevée.

Il faut donc transporter l'électricité sous haute tension.

J'évalue mes acquis



Dis pourquoi le transport de l'énergie électrique s'effectue sous haute tension.

II- RÉSUMÉ DE COURS

- On considère un dipôle alimenté par un courant alternatif et sinusoïdal u et traversé par un courant i d'expressions suivantes : $i = I\sqrt{2}\cos\omega t$ et $u = U\sqrt{2}\cos(\omega t + \varphi)$.

- La puissance instantanée $\mathcal{P}$ consommée ou fournie par ce dipôle est :

$$\mathcal{P} = u(t) \times i(t) = u \times i$$

Autre expression

$$\mathcal{P} = UI[\cos(2\omega t + \varphi) + \cos\varphi]$$

- La puissance moyenne consommée par un dipôle sur une période est :

$$\mathcal{P} = UI \cos \varphi$$

- $\mathcal{P}$: puissance active en watt (W) ;
- UI : puissance apparente en volt-ampère (V.A) ;
- $\cos \varphi$: facteur de puissance.

- L'énergie moyenne consommée par ce dipôle pendant une durée Δt est : $E = UI \Delta t \cos \varphi$.
- La puissance moyenne consommée par un dipôle RLC série en régime alternatif et sinusoïdal est :
 $\mathcal{P} = RI^2$

- Transformation d'énergie dans un dipôle RLC série en régime alternatif et sinusoïdal

$$E = \mathcal{P} \Delta t = RI^2 \Delta t$$

L'intégralité de l'énergie électrique reçue par un dipôle RLC est transformée en chaleur à travers la résistance R par effet Joule.

- Expression de l'énergie perdue par effet Joule dans les lignes lors du transport de l'électricité

$$E' = r \left(\frac{\mathcal{P}}{U \cos \varphi} \right)^2 \Delta t$$

r : résistance des lignes de transport.

$\mathcal{P}$: puissance reçue par le consommateur.

U : tension entre les bornes de l'installation électrique du consommateur.

- Pour réduire ou minimiser les pertes par effet Joule dans les lignes lors du transport de l'électricité, il faut :
 - avoir un facteur de puissance $\cos \varphi$ proche de 1** : installer des condensateurs de couplage sur les lignes pour réduire l'effet inductif dû aux bobinages dans les moteurs ;
 - effectuer un transport sous haute tension** : installer un transformateur élévateur de tension à la sortie de l'usine et un transformateur abaisseur de tension à la porte de l'utilisateur.

III- MÉTHODES

- Pour déterminer la puissance moyenne consommée, on utilise l'expression : $\mathcal{P} = UI \cos \varphi$.
- Il faut savoir que cette puissance est intégralement dissipée par effet Joule dans la résistance du circuit RLC série $\mathcal{P} = UI \cos \varphi = RI^2$.
Le produit UI est la puissance apparente notée $\mathcal{P}_a$, exprimée en volt-ampère (V.A).
- Le facteur de puissance est une valeur numérique comprise entre 0 et 1 : $\cos \varphi = 1$ est valable pour un récepteur purement résistif, tandis que $\cos \varphi = 0$ est valable pour un récepteur purement réactif (inductance ou capacité).
- Pour déterminer l'énergie électrique consommée, on utilise l'expression : $E = \mathcal{P} \Delta t = RI^2 \Delta t$

IV- EXERCICES RÉSOLUS

Exercice 1

Un dipôle RLC série a les caractéristiques suivantes : $R = 28,5 \, \Omega$, $L = 0,37 \, \text{H}$ et $C = 20 \, \mu\text{F}$.

L'intensité instantanée du courant (en milliampères) dans le circuit comportant ce dipôle est :
 $i = 12,5 \sin 180t$.

- Calcule l'impédance Z de ce dipôle sachant que $Z = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right)^2}$
- Détermine :
 - le facteur de puissance $\cos \varphi$ du dipôle ;

- 2.2- la tension efficace U aux bornes de l'ensemble des dipôles associés en série ;
- 2.3- les tensions électriques U_R aux bornes du conducteur ohmique de résistance R , U_L aux bornes de la bobine d'inductance L et U_C aux bornes du condensateur de capacité C .
- 3- Déduis les puissances électriques consommées par chacun des composants du dipôle et par l'ensembles des dipôles associés en série.
- 4- Conclue.

Exercice 2

Un circuit électrique comporte un générateur basses fréquences qui établit une tension alternative et sinusoïdale : $u = 10\sqrt{2}\cos\omega t$. On branche en série à ses bornes un conducteur ohmique de résistance $R = 10 \Omega$, une bobine pure d'inductance $L = 0,1 \text{ H}$ et un condensateur de capacité $C = 0,4 \mu\text{F}$.

- 1- Détermine la puissance moyenne $\mathcal{P}$ consommée par le circuit :
 - 1.1- à la résonance d'intensité ;
 - 1.2- lorsque la pulsation ω prend une des valeurs ω_1 ou ω_2 qui limitent la bande passante.
- 2- Conclue.

Exercice 3

A l'aide d'un wattmètre, on mesure la puissance moyenne consommée par un moteur ; on trouve $\mathcal{P} = 1850 \text{ W}$.

La tension efficace aux bornes du moteur vaut 220 V et l'intensité efficace du courant qui le traverse est $I = 9,7 \text{ A}$.

- 1- Détermine :
 - 1.1- la puissance apparente de ce moteur ;
 - 1.2- son facteur de puissance.
- 2- Dis si la puissance apparente est égale à celle consommée en régime sinusoïdal forcé.
- 3- Détermine l'énergie E consommée par le moteur pendant une durée $\Delta t = 20 \text{ s}$.

Résolution de l'exercice 1

$$1- \text{L'impédance } Z = \sqrt{28,5^2 + \left(0,37 \times 180 - \frac{1}{20 \cdot 10^{-6} \times 180}\right)^2} = 213,1 \Omega.$$

2-

2.1- Le facteur de puissance

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{28,5}{213,1} = 0,134$$

2.2- La tension efficace

$$U = Z \cdot I = Z \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 213,1 \times \frac{12,5 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{2}} = 1,88 \text{ V}.$$

2.3- Les tensions efficaces U_R , U_L et U_C

$$U_R = R \cdot I = R \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 28,5 \times \frac{12,5 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{2}} = 0,25 \text{ V}.$$

$$U_L = L \omega I = L \omega \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,37 \times 180 \times \frac{12,5 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{2}} = 0,59 \text{ V}.$$

$$U_C = \frac{I}{C \omega} = \frac{I_m}{C \omega \sqrt{2}} = \frac{12,5 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^{-6} \times 180 \sqrt{2}} = 2,45 \text{ V}.$$

3- Déduction de la puissance électrique consommée par :

$$\text{- le conducteur ohmique } R : \mathcal{P}_R = U_R \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cos(\varphi_{u_R/i}) \text{ or } \varphi_{u_R/i} = 0 ; \mathcal{P}_R = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ W}$$

$$\text{- la bobine pure : } \mathcal{P}_L = U_L \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cos(\varphi_{u_L/i}) \text{ or } \varphi_{u_L/i} = \frac{\pi}{2} \text{ rad ; } \mathcal{P}_L = 0 \text{ W}$$

- le condensateur : $\mathcal{P}_c = U_c \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cos(\varphi_{u_c/i})$ or $\varphi_{u_c/i} = -\frac{\pi}{2} \text{ rad} \Rightarrow \mathcal{P}_c = 0 \text{ W}$
- le dipôle RLC : $\mathcal{P} = U \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cos(\varphi_{u/i}) = 1,88 \times \frac{12,5 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{2}} \times 0,134 = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ W}$

4- Je conclus que :

- une bobine pure et un condensateur parfait ne consomment pas de puissance sur une période.
- la puissance consommée par un dipôle RLC l'est par le conducteur ohmique et est dissipée intégralement par effet Joule.

Commentaire :

- Connaître et savoir appliquer les expressions de facteur de puissance : $\cos \varphi = \frac{R}{Z}$ et $\cos \varphi = \frac{\mathcal{P}}{I \cdot U}$.
- Connaître et savoir appliquer l'expression de la puissance consommée sur une période : $\mathcal{P} = UI \cos \varphi$.

Résolution de l'exercice 2

1- La puissance moyenne consommée par le circuit

1.1- à la résonance d'intensité

$$\mathcal{P} = R I_0^2 \text{ avec } I_0 = \frac{U}{R} = \frac{10}{10} = 1 \text{ A ; } \mathcal{P} = 10 \times 1^2 = 10 \text{ W.}$$

1.2- lorsque ω prend une des valeurs ω_1 ou ω_2 qui limitent la bande passante $I = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$ d'où

$$\mathcal{P} = R \left(\frac{I_0}{\sqrt{2}} \right)^2 = 5 \text{ W}$$

2- Je conclus que la puissance moyenne consommée lorsque ω prend une des valeurs qui limitent la bande passante est la moitié de celle qui est dissipée à la résonance d'intensité.

Commentaire :

- Savoir que la puissance consommée sur une période en régime sinusoïdal forcé est égale à celle dissipée par effet Joule par la résistance : $\mathcal{P} = R I^2$.

Résolution de l'exercice 3

1- Déterminons :

1.1- la puissance apparente

$$\mathcal{P}_a = U \cdot I = 220 \times 9,7 = 2134 \text{ V.A ou } 2,134 \text{ kVA}$$

1.2- le facteur de puissance de ce moteur

$$\mathcal{P} = UI \cos \varphi \Rightarrow \cos \varphi = \frac{\mathcal{P}}{I \cdot U} = \frac{1850}{9,7 \times 220} = 0,867$$

2- La puissance apparente est différente de celle consommée sur une période par un dipôle RLC.

3- Déterminons l'énergie consommée

$$E = \mathcal{P} \cdot \Delta t = 1850 \times 20 = 37000 \text{ J ou } 37 \text{ kJ.}$$

Commentaire :

- Savoir que le produit $U \cdot I$ représente la puissance apparente ($\mathcal{P}_a$) différente de la puissance consommée.
- Connaître et savoir appliquer les expressions d'énergie consommée : $E = \mathcal{P} \cdot \Delta t = R I^2 \cdot \Delta t$.

V- JE M'EXERCE

Exercices de fixation/ Application

1 Reproduis puis relie, par un trait, chaque grandeur physique à son expression littérale.

Grandeur physique	Expression littérale
Puissance instantanée •	• $U.I.\cos\varphi$
Puissance apparente •	• $u.i$
Puissance moyenne consommée •	• $u.i.\cos\varphi$
	• $U.I$
	• $U.I.t$

- 2
- Définis le facteur de puissance $\cos\varphi$.
 - Donne l'expression de l'énergie électrique E échangée dans un dipôle RLC.
 - Donne l'expression de la puissance moyenne P reçue par un dipôle RLC.
 - Montre l'intérêt d'un facteur de puissance élevé.

3 Réarrange les mots ou groupes de mots de sorte à donner l'information exacte à tes camarades. les condensateurs / ne consomment / un dipôle RLC / sous forme / dans la résistance / La puissance moyenne / cependant / thermique, / aucune énergie. / reçue par / et / apparaît / les inductances

4 Écris le numéro de la proposition suivi de V si elle est vraie ou de F si elle est fausse.

- Le facteur de puissance est maximal à la résonance d'intensité.
- La puissance apparente s'exprime en watt.
- Plus le facteur de puissance est voisin de 1, plus les pertes en lignes sont importantes.
- Le facteur de puissance est le quotient du

rapport de la puissance moyenne consommée par la puissance apparente.

- La puissance moyenne reçue par un dipôle RLC apparaît sous forme thermique dans le conducteur ohmique.
- On transporte l'énergie électrique sous haute tension pour minimiser les pertes en lignes.
- En régime sinusoïdal forcé, la bobine pure consomme autant d'énergie que la résistance.

5 Tu réalises un circuit RLC série avec un conducteur ohmique de résistance R , une bobine idéale d'inductance $L = 100 \text{ mH}$ et un condensateur de capacité $C = 500 \text{ pF}$. Ce circuit est alimenté par un générateur délivrant une tension alternative et sinusoïdale de valeur efficace $U = 12 \text{ V}$. Les variations de $I = f(N)$ atteignent leur maximum pour l'intensité efficace $I = 1200 \text{ mA}$.

Pour cette valeur de I :

- ce circuit a pour facteur de puissance :
 - $\cos\varphi = 0$;
 - $\cos\varphi = 1$;
 - $\cos\varphi = -1$;
 - $\cos\varphi = 0,9$.
- ce circuit reçoit une puissance apparente :
 - $\mathcal{P}_s = 14,4 \text{ W}$;
 - $\mathcal{P}_s = 14400 \text{ V.A}$;
 - $\mathcal{P}_s = 14400 \text{ W}$;
 - $\mathcal{P}_s = 14,4 \text{ V.A}$.
- ce circuit consomme une puissance moyenne :
 - $\mathcal{P}_s = 14,4 \text{ W}$;
 - $\mathcal{P}_s = 14,4 \text{ V.A}$;
 - $\mathcal{P}_s = 14400 \text{ W}$;
 - $\mathcal{P}_s = 14400 \text{ V.A}$.
- le conducteur ohmique a une résistance :
 - $R = 100 \Omega$;
 - $R = 10^{-5} \Omega$;
 - $R = 10 \Omega$;
 - $R = 1000 \Omega$.

Recopie la lettre correspondant à la bonne réponse pour chaque cas.

Exercices de renforcement/ Approfondissement

6. Le facteur de puissance d'un moteur a pour valeur $\cos\varphi = 0,92$. Son rendement énergétique est égal à $\eta = 0,90$. Il fournit une puissance mécanique $\mathcal{P}_m = 1200 \text{ W}$ lorsqu'il est alimenté sous une tension efficace $U = 220 \text{ V}$.

- 1- Détermine la puissance $\mathcal{P}_r$ reçue par le moteur.
- 2- Détermine l'intensité efficace I du courant qui le traverse.
- 3- Dédus :
 - 3.1- la valeur de la puissance apparente $\mathcal{P}_s$ reçue par le moteur ;
 - 3.2- la résistance totale R du moteur.

7. Un circuit électrique est constitué d'un conducteur ohmique de résistance R et d'une bobine d'inductance L , de résistance négligeable et des fils de connexion.

- 1- On alimente le circuit sous une tension continue $U = 6 \text{ V}$; l'intensité du courant est $I = 0,2 \text{ A}$. Détermine la résistance R et la puissance consommée par ce circuit.
- 2- Le circuit est ensuite alimenté sous une tension alternative de valeur efficace $U = 6 \text{ V}$ et de fréquence $N = 50 \text{ Hz}$. L'intensité efficace est $I = 0,1 \text{ A}$.
 - 2.1- Détermine la puissance moyenne $\mathcal{P}$ consommée.
 - 2.2- Dédus le facteur de puissance $\cos\varphi$, l'impédance Z puis l'inductance L de la bobine.
- 3- Un condensateur associé en série amène le facteur de puissance du circuit à $\cos\varphi' = 0,8$.
 - 3.1- Détermine l'impédance Z du nouveau circuit.
 - 3.2- Détermine la puissance $\mathcal{P}'$ consommée par ce circuit si la tension efficace aux bornes reste égale à 6 V .

8. Un appareil électrique est alimenté par une tension alternative et sinusoïdale de valeur efficace $U = 220 \text{ V}$, de pulsation $\omega = 100\pi \text{ rad/s}$. Cet appareil est assimilable à un dipôle de résistance $R = 10 \Omega$ et de réactance d'induction $X = L\omega$. Lorsqu'il reste branché pendant une durée $\Delta t = 2 \text{ h}$, on relève sur le compteur de l'installation une consommation de $0,89 \text{ kWh}$.

- 1- Détermine la puissance moyenne $\mathcal{P}$ consommée par l'appareil
- 2- Dédus l'intensité efficace I du courant qui le traverse et sa puissance apparente $\mathcal{P}_s$.

3- Détermine :

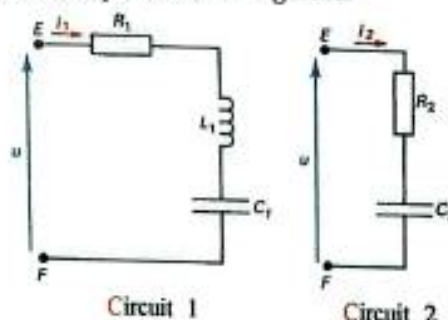
- 3.1- le facteur de puissance $\cos\varphi$ de cet appareil ;
- 3.2- la réactance d'induction X .

9.

1- Un moteur est traversé, en régime d'utilisation normale, par un courant alternatif sinusoïdal de fréquence $f = 50 \text{ Hz}$, de pulsation ω et de valeur efficace $I = 2 \text{ A}$. Le courant fournit au moteur, en régime d'utilisation normale, une puissance moyenne $\mathcal{P} = 400 \text{ W}$. Le moteur est alors assimilable à une bobine RL de résistance R , d'inductance L et de facteur de puissance $\cos\varphi = 0,8$.

- 1.1- Détermine la tension efficace U aux bornes du moteur en régime d'utilisation normale.
- 1.2- Montre que $R = 100 \Omega$ et $L = 0,24 \text{ H}$.
- 2- Ce moteur ne satisfait pas aux normes de la compagnie de distribution d'électricité qui exige que l'on mette en série avec le moteur un condensateur de capacité C pour que l'ensemble ait un facteur de puissance $\cos\varphi' = 0,9$.
 - 2.1- Détermine l'impédance Z du dipôle (moteur, condensateur).
 - 2.2- Dédus la plus petite valeur possible de C .

10. Une source S fournit entre deux points E et F une tension alternative et sinusoïdale $u = U\sqrt{2} \cos\omega.t$ de valeur efficace constante $U = 20 \text{ V}$ et de pulsation ω réglable.



- 1- On branche entre E et F le circuit (1) qui comprend un conducteur ohmique de résistance $R_1 = 400 \Omega$ en série avec condensateur de capacité $C_1 = 0,5 \mu\text{F}$, une bobine d'inductance $L_1 = 0,25 \text{ H}$ et de résistance négligeable.
 - 1.1- Donne l'expression littérale de la puissance consommée $\mathcal{P}_1$ par le circuit 1 en régime sinusoïdal forcé.

- 1.2- Dis dans quel élément du circuit cette puissance est-elle dissipée. Justifie ta réponse.
- 1.3- Détermine pour quelle valeur ω_0 de ω la puissance consommée dans le circuit 1 est maximale.
- 1.4- Calcule ω_0 et la puissance maximale consommée dans le circuit 1.
- 2- On remplace le circuit 1 par le circuit 2 ci-dessus comprenant un conducteur ohmique

- résistance $R_2 = R_1 = 400 \Omega$ en série avec un condensateur de capacité $C_2 = 1 \mu F$.
- Exprime la puissance $\mathcal{P}_2$ consommée dans le circuit 2 en fonction de R_2 et de I_2 .
- 3- On désire que les puissances $\mathcal{P}_1$ et $\mathcal{P}_2$ soient égales :
 - 3.1- montre que ceci est réalisé pour deux valeurs de ω (ω' et ω'' avec $\omega' < \omega''$) que tu exprimeras en fonction de L_1 , C_1 et C_2 .
 - 3.2- Calcule ω' et ω''

Situations d'évaluation

11 L'Unité Pédagogique (U.P) de Physique-Chimie dont dépend ton établissement organise un test de sélection des meilleurs élèves de Terminales scientifiques en vue de leur participation à un concours national. Le test proposé aux candidats à cet effet porte sur un transformateur de distribution d'électricité.

À partir d'un transformateur de distribution, une ligne CIE de résistance $R = 0,6 \Omega$ alimente une installation domestique de bornes A et B. Un compteur électrique est branché entre A et B. On appelle U la tension efficace aux bornes du compteur, $\cos\varphi$ le facteur de puissance de l'installation et $\mathcal{P}_m$ la puissance électrique moyenne consommée. Les candidats doivent évaluer les pertes d'énergie électrique pour deux valeurs de la tension efficace.

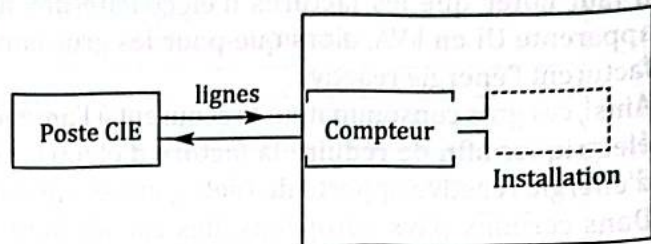
Tu participes à ce test.

Données : $U_1 = 110 V$; $U_2 = 220 V$; $\cos\varphi = 0,96$; $\mathcal{P}_m = 10 kW$.

- 1- Donne l'expression de la puissance moyenne consommée par une installation domestique.
- 2- Etablis l'expression littérale de la puissance calorifique ($\mathcal{P}_{cal}$) perdue dans la ligne CIE en fonction de $\mathcal{P}_m$, $\cos\varphi$, U et R .
- 3- Calcule la puissance calorifique perdue en lignes lorsque :
 - 3.1- $U = U_1$;
 - 3.2- $U = U_2$.
- 4- Conclus.

12 Au cours d'une évaluation, votre professeur propose le schéma ci-après représentant une installation électrique.

Cette installation est alimentée en courant alternatif par une ligne CIE comportant deux fils. La résistance totale de la ligne est $R = 3 \Omega$.



L'utilisateur branche pendant 4 h un moteur de puissance $\mathcal{P} = 2,2 kW$, de facteur de puissance $\cos\varphi = 0,6$.

La tension efficace de fonctionnement aux bornes du moteur est $U = 220 V$.

- 1- Donne les expressions de la puissance moyenne et de l'énergie électrique.
- 2- Calcule :
 - 2.1- l'intensité efficace I du courant dans les lignes ;
 - 2.2- l'énergie perdue E_j par effet joule dans les lignes ;
 - 2.3- l'énergie E_f facturée à l'utilisateur ;
 - 2.4- l'énergie fournie E_f par le poste de distribution CIE.
- 3- Détermine le rapport ρ de l'énergie facturée à l'énergie fournie par la CIE.
- 4- Conclus.

Nota bene: les énergies seront exprimées en kWh.

13 Une compagnie d'énergie électrique doit fournir une puissance moyenne $\mathcal{P} = 10 kW$ à deux installations électriques de facteurs de puissance respectifs $\cos\varphi_1 = 0,9$ et $\cos\varphi_2 = 0,6$. Chacune des installations est alimentée sous une tension de valeur efficace $U = 220 V$.

Les résistances des lignes sont identiques et égales à r .

Tu es invité(e) à montrer l'influence du facteur de puissance sur les pertes d'énergie par effet Joule dans les lignes.

- 1- Donne l'expression de la puissance moyenne.

2- Détermine :

- 2.1- la valeur de l'intensité du courant électrique parcourant chaque installation ;
- 2.2- la puissance perdue par effet Joule dans

chaque cas.

3- Montre l'influence du facteur de puissance sur ces pertes.

VI- RENDEZ-VOUS DES CURIEUX

Influence du facteur de puissance sur la facture d'électricité

Si le facteur de puissance d'une installation électrique est faible, l'intensité du courant électrique consommée est grande, d'où une facture d'électricité plus élevée. Dans le cas contraire, la facture d'électricité est faible.

Il faut noter que les factures d'électricité des ménages sont établies sur la base de la puissance apparente UI en kVA, alors que pour les gros consommateurs, les distributeurs d'énergie électrique facturent l'énergie réactive.

Ainsi, ces gros consommateurs recourent à l'amélioration du facteur de puissance de leurs installations électriques afin de réduire la facture d'électricité. En effet, une bonne gestion de la consommation d'énergie réactive apporte de réels gains économiques.

Dans certains pays européens, des calculs sont basés sur une structure tarifaire actuellement en vigueur, conçue pour encourager les consommateurs à minimiser leur consommation d'énergie réactive.

De façon technique, l'installation de batteries de condensateurs pour améliorer le facteur de puissance de l'installation permet de réduire la facture d'électricité en maintenant le niveau de la consommation de puissance réactive en dessous d'une valeur définie contractuellement avec le fournisseur d'énergie.

Dans cette tarification particulière, l'énergie réactive est payée suivant la valeur du critère $\tan \varphi$.

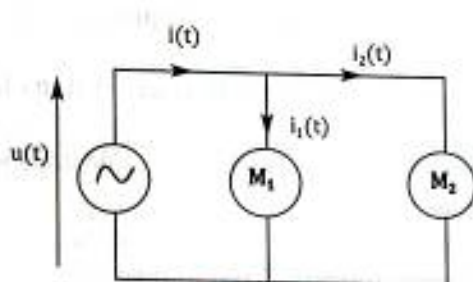


figure 1

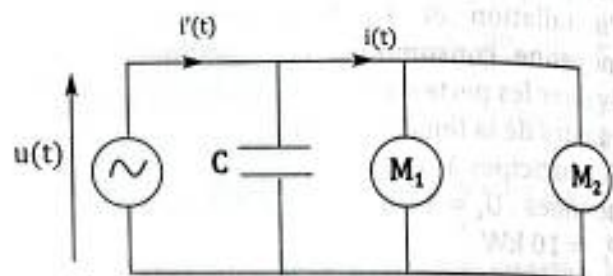


figure 2

LEÇON 14

RÉACTIONS NUCLÉAIRES SPONTANÉES

TABEAU DES HABILETÉS ET DES CONTENUS

HABILETÉS	CONTENUS
Définir	les termes suivants ; - élément chimique ; - nucléide ;
Définir	la radioactivité.
Connaître	• la nature des particules α , β et du rayonnement γ . • les lois de conservation des nombres de masse et de charge.
Ecrire	les équations bilans des désintégrations α et β .
Définir	l'activité d'un échantillon $A = A_0 e^{-\lambda t}$.
Connaître	l'unité légale d'activité.
Établir	la loi de décroissance radioactive $N = N_0 e^{-\lambda t}$.
Utiliser	la loi de décroissance radioactive.
Définir	la période ou demi-vie d'une substance radioactive.
Déterminer	• la constante radioactive. • la période.
	• l'activité. • l'âge d'un échantillon radioactif.

NOTIONS ESSENTIELLES

- Radioactivité ;
- Émissions α , β ;
- Rayonnement γ ;
- Constante radioactive ;
- Période radioactive ou demi-vie ;
- Activité radioactive ;
- Décroissance radioactive.

SITUATION D'APPRENTISSAGE

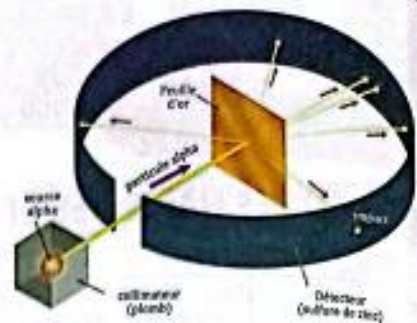
En suivant une émission documentaire sur les découvertes archéologiques avec ses frères, un élève, en classe de terminale D, apprend que les archéologues peuvent déterminer l'âge des vestiges en utilisant des connaissances en radioactivité. Pour en savoir d'avantage, il en parle à ses camarades de classe et ensemble, sous la conduite de leur professeur, ils entreprennent des recherches en vue de définir l'activité d'un échantillon, de connaître la loi de décroissance radioactive, de déterminer la constante radioactive, la période, l'activité puis l'âge d'un échantillon radioactif.



I- ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1 : DÉFINIR LES NOTIONS DE L'ÉLÉMENT CHIMIQUE, DE NUCLÉIDE, D'ISOTOPES ET D'UNITÉ DE MASSE

L'expérience de Rutherford fut réalisée en 1909. Elle a consisté à bombarder une très fine feuille d'or (6 000 Å) par des particules α (noyaux d'hélium, He^{2+}). Un écran placé derrière la feuille d'or, enrichi de sulfure de zinc, permet de visualiser différents points lumineux. Ces points ne sont pas tous dans l'orientation du faisceau, mais certains étalés sur de grands angles. Rutherford eut ainsi la surprise d'observer une sorte de rebond des particules alpha.



Document 1 : Expérience de Rutherford

- 1- Interprète l'expérience de Rutherford.
- 2- Donne le modèle de représentation de l'atome par Ernest Rutherford.
- 3- Rappelle les notions de :
 - 3.1- élément chimique ;
 - 3.2- nucléide ;
 - 3.3- isotope.
- 4- Définis l'unité de masse atomique.

Je fais le point de l'activité

1- Interprétation de l'expérience Rutherford

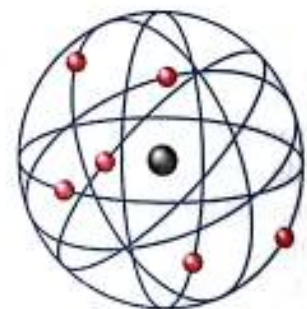
La majorité des particules α traversent la feuille d'or sans être déviées. Seulement une infime partie de ces particules, de l'ordre de 0,01 %, est déviée. De cette expérience, nous pouvons déduire que la matière a une structure lacunaire. Elle est constituée essentiellement de vide, raison pour laquelle la plupart des particules ne sont pas déviées. Cependant, il existe des îlots de charges positives qui repoussent les particules α . L'ordre de grandeur de ces îlots est très petit par rapport à l'atome (de l'ordre de 100 000 fois plus petit).

2- Modèle de l'atome proposé par Rutherford

Jusqu'alors, les électrons, portant les charges négatives, étaient satellisés autour d'un noyau positif très petit.

À la suite de son expérience, Ernest Rutherford proposa un modèle « planétaire » de l'atome.

Dans ce modèle, l'atome est présenté comme un système solaire en miniature, avec des électrons en orbite autour d'un noyau massif, et comme un espace essentiellement vide, le noyau n'occupant qu'une très petite partie de l'atome.



3- Rappel des notions : élément chimique, nucléide ; isotopes

Rappelons d'abord que le noyau est constitué de particules appelées nucléons qui sont de deux sortes :

- les protons, de masse m_p chacun, chargés positivement, de nombre Z appelé numéro atomique ;
- les neutrons, de masse m_n chacun, sans charge, de nombre N .

Les protons et les neutrons constituent les nucléons.

$$m_p = 1,67262 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_n = 1,674\,927\,471 \cdot 10^{-27} \text{ kg. Le neutron est } 1,001\,4 \text{ fois plus massif que le proton.}$$

• Élément chimique

On appelle élément chimique, l'ensemble des entités chimiques (atomes ou ions...) qui possède le même numéro atomique Z .

Exemple : l'atome d'oxygène 16 de symbole $^{16}_8\text{O}$, l'atome d'oxygène 18 de symbole $^{18}_8\text{O}$ et l'ion oxyde $^{16}_8\text{O}^{2-}$ sont du même élément chimique oxygène.

• Nucléide

Un nucléide est un noyau atomique caractérisé par son nombre de protons et son nombre de neutrons. Il est représenté par ^A_ZX . $A = Z + N$

Exemple : l'atome de sodium $^{23}_{11}\text{Na}$ et l'ion sodium $^{23}_{11}\text{Na}^+$ sont le même nucléide.

• Isotopes

On appelle isotopes, des nucléides ayant le même nombre de protons mais des nombres de neutrons différents.

Exemple : l'oxygène $^{16}_8\text{O}$ et l'oxygène $^{18}_8\text{O}$ sont des isotopes.

4- L'unité de masse atomique

L'unité de masse atomique, de symbole « u », est une unité de mesure standard, utilisée pour exprimer la masse des atomes et des molécules. Elle est égale au $\frac{1}{12}$ de la masse d'un atome de carbone 12.

$$1 \text{ u} = 1,660\,538\,921 \cdot 10^{-27} \text{ kg.}$$

$$m_p = 1,67262 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,007\,276\,5 \text{ u}$$

$$m_n = 1,674\,927\,471 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,0087 \text{ u} ; m_p = 1,0073 \text{ u}$$

J'évalue mes acquis



Soit le nucléide suivant : $^{63}_{29}\text{Cu}$.

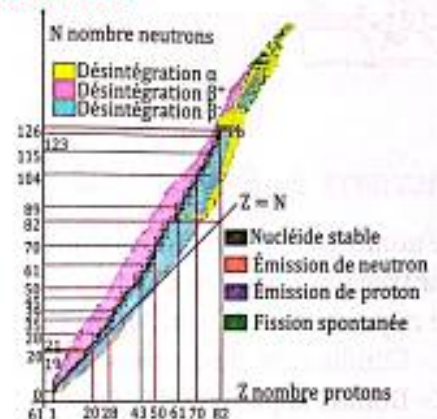
Donne son nombre :

- de nucléons ;
- de protons ;
- de neutrons ;
- d'électrons dans le cortège électronique.

ACTIVITÉ 2 : DÉCOUVRIR LES DIFFÉRENTES ÉMISSIONS RADIOACTIVES

Observe le document 2 et informe-toi sur la radioactivité.

- Définis la radioactivité.
- Donne les différents types de radioactivité.
- Donne les lois de conservation lors des réactions radioactives.
- Écris les équations-bilans des différents types de désintégration et puis équilibre-les.



Document 2 : Un diagramme de stabilité des noyaux

Je fais le point de l'activité

1- Définition

La radioactivité est la transformation spontanée d'un noyau atomique instable en un autre **noyau plus stable**, accompagné d'une particule et d'émission d'un rayonnement radioactif γ .

En effet, les atomes sont stables lorsque le nombre de neutrons dans le noyau est à peu près équivalent au nombre de protons. Lorsqu'il y a un déséquilibre important entre le nombre de neutrons et le nombre de protons dans le **noyau**, l'atome devient **instable**.

2- Les différents types de radioactivité

Selon la nature de la particule émise, on distingue trois (03) types d'émissions radioactives :

Radioactivité	Nom de la particule émise	Symbole de la particule
Radioactivité α	Noyau d'hélium α	${}^4_2\text{He}$
Radioactivité β^-	Électron e^-	${}^0_{-1}e^-$
Radioactivité β^+	Positron (antiélectron) e^+	${}^0_1e^+$

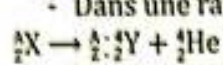
Lors de toute désintégration radioactive d'un nucléide d'équation-bilan:

${}_Z^AX \rightarrow {}_Z^AY + {}_Z^AR$; on peut observer les lois de conservation suivantes :

- la loi de conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie ;
- la loi de conservation du nombre de charge : $Z = Z_1 + Z_2$;
- la loi de conservation du nombre de masse : $A = A_1 + A_2$;

Remarque : les lois de conservations du nombre de charge et du nombre de nucléons sont aussi appelées les lois de Soddy.

- Dans une radioactivité α , il y a émission de noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$. L'équation bilan s'écrit :



- Dans le cas de la radioactivité β^+ , il y a émission de positon selon l'équation : ${}_Z^AX \rightarrow {}_Z^{A-1}Y + {}^0_1e^+ + \nu$.

Le proton du noyau se transforme en neutron avec émission d'un neutrino ν : ${}_1^1p \rightarrow {}_0^1n + {}^0_1e^+ + \nu$. Elle ne concerne que certains radioéléments artificiels.

- Lors d'une radioactivité β^- , c'est un électron qui est émis selon l'équation : ${}_Z^AX \rightarrow {}_Z^{A-1}Y + {}^0_{-1}e^- + \bar{\nu}$.

Le neutron du noyau se transforme en positron avec émission d'un antineutrino $\bar{\nu}$: ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}^0_{-1}e^- + \bar{\nu}$.

- La désintégration γ est l'émission de photons γ lors du retour d'un noyau radioactif excité à l'état fondamental, ${}_Z^AX^* \rightarrow {}_Z^AX + \gamma$.

L'équation-bilan de la désintégration est : ${}_Z^AX^* \rightarrow {}_Z^AX + \gamma$

J'évalue mes acquis



L'isotope ${}^{40}_{19}\text{K}$ est un élément radioactif naturel dont le noyau peut se désintégrer par radioactivité β^- ou par radioactivité β^+ . Les éléments voisins du potassium dans la classification périodique sont : ${}_{17}\text{Cl}$; ${}_{18}\text{Ar}$; ${}_{20}\text{Ca}$; ${}_{21}\text{Sc}$.

- Nomme le noyau fils obtenu lors de la désintégration β^- du nucléide ${}^{40}_{19}\text{K}$.
- Nomme le noyau fils obtenu lors de la désintégration β^+ du nucléide ${}^{40}_{19}\text{K}$.
- Écris les équations-bilans des transformations radioactives correspondantes.

ACTIVITÉ 3 : ÉTABLIR LA LOI DE DÉCROISSANCE RADIOACTIVE

Le nombre de noyaux (ou d'atomes) d'une source radioactive diminue constamment au cours du temps par transformation en d'autres noyaux. La loi de décroissance radioactive permet de calculer le nombre de noyaux restant à un instant t quelconque.

- Établis la loi de décroissance radioactive.
- Définis la période ou demi-vie d'un noyau radioactif.
- Définis l'activité d'un échantillon.

Je fais le point de l'activité

1- Loi de décroissance radioactive

Lors d'une désintégration radioactive, notons N_0 , le nombre initial des noyaux radioactifs à l'instant t_0 et N , le nombre des noyaux radioactifs à l'instant t .

La variation du nombre de noyaux dN pendant une petite durée dt est proportionnelle à N . Elle est exprimée par la relation : $\frac{dN}{dt} = -\lambda N$

λ est la constante radioactive, dépendant de la nature du noyau, exprimée en s^{-1} . Le signe négatif indique qu'il y a décroissance du nombre de noyaux.

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \Rightarrow \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = \int_0^t -\lambda dt$$

$$[\ln N]_{N_0}^N = -\lambda [t]_0^t$$

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda(t - 0)$$

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\lambda t$$

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} ; \text{ d'où : } N = N_0 e^{-\lambda t}, \text{ la loi de}$$

décroissance radioactive.

2. Période radioactive

La période radioactive T (ou demi-vie) d'un nucléide est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux radioactifs initialement présents se sont désintégrés.

$$\text{À } t = T, \text{ on a : } N = \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T} ; \frac{1}{2} = e^{-\lambda T}.$$

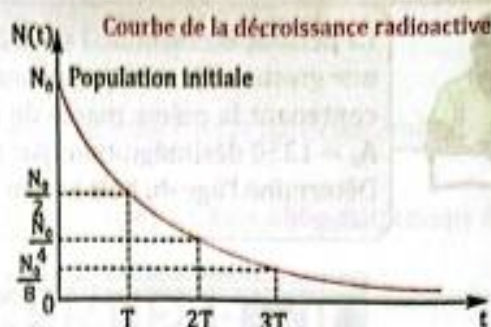
$$\text{On obtient alors : } \ln 2 = \lambda T, \text{ soit } T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Les périodes des nucléides radioactifs varient dans un très large domaine et on les exprime dans l'unité de temps qui convient le mieux : seconde, minute, heure, jour, année ou même siècle. L'unité de la constante radioactive λ est s^{-1} .

L'activité A d'une substance radioactive représente le nombre moyen de désintégrations par seconde : $A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N = A_0 e^{-\lambda t}$. On peut alors écrire $A = A_0 e^{-\lambda t}$, avec $A_0 = \lambda N_0$.

Dans le système international d'unités, l'activité A s'exprime en becquerel, de symbole Bq : 1 Bq = 1 désintégration par seconde.

Remarque : La courbe de la décroissance radioactive est une exponentielle décroissante.



J'évalue mes acquis



La demi-vie ou période du polonium 210 ($^{210}_{84}\text{Po}$) est égale à 140 jours. À la date $t = 0$, un corps radioactif contient 1 g de cet isotope.

a) Détermine la masse de l'isotope contenu dans l'échantillon au bout de 420 jours.

b) Détermine la masse de l'isotope contenu dans l'échantillon au bout de 2 ans.

On prendra : 1 année = 365,25 jours.

ACTIVITÉ 4 : DÉTERMINER L'ÂGE D'UN ÉCHANTILLON RADIOACTIF

Documente-toi.

Explique la datation des objets avec le carbone 14.

Je fais le point de l'activité

Le carbone 14 est un émetteur β^- .

Quand la vie s'arrête, l'absorption du carbone 14 cesse et la radioactivité en carbone 14 décroît.

Sa période est de 5560 années.

On détermine l'âge d'un objet ancien en mesurant l'activité en carbone 14 de deux masses égales de carbone.

- l'une provenant d'un jeune objet : $A_0 = \lambda N_0$

- l'autre prélevée sur l'objet ancien : $A = \lambda N = A_0 e^{-\lambda t}$

L'âge s'obtient par la relation : $\frac{N}{N_0} = \frac{A}{A_0} = e^{-\lambda t}$

$$\text{D'où : } t = \frac{1}{\lambda} \times \ln \frac{A_0}{A}$$

J'évalue mes acquis



La période du carbone 14 est $T = 5590$ années. Un échantillon de bois, trouvé dans une grotte préhistorique, donne $A = 212$ désintégrations par minute. Un échantillon contenant la même masse de carbone et préparé à partir d'un jeune bois donne $A_0 = 1350$ désintégrations par minute. Détermine l'âge du bois ancien.

II- RÉSUMÉ DE COURS

- Un atome est constitué d'un noyau central, chargé positivement, autour duquel gravitent des électrons, chargés négativement.
- Les constituants du noyau atomique sont les protons, chargés positivement, et les neutrons, électriquement neutres : on les appelle nucléons.
- Un élément chimique est l'ensemble des entités caractérisées par le même numéro atomique Z .
- Un nucléide est l'ensemble des noyaux atomiques caractérisés par le même nombre de protons et le même nombre de neutrons.
- Les isotopes d'un élément sont les nucléides ayant un même nombre de charge Z , mais avec des nombres de masse différents.
- L'unité de masse atomique u est la fraction de $\frac{1}{12}$ de la masse de l'atome de carbone $^{12}_6\text{C}$:
 $1 u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.
- Il existe quatre (04) sortes de rayonnements radioactifs : les rayonnements α , β^- , β^+ et γ .
 - la radioactivité α correspond à la désintégration spontanée d'un noyau lourd instable qui expulse une particule α et donne un noyau fils plus stable.
 Son équation-bilan est : $^A_Z\text{X} \rightarrow ^A_{Z-2}\text{Y} + ^4_2\text{He}$.
 - La radioactivité β^- correspond à la désintégration d'un noyau avec émission d'un électron $^0_{-1}\text{e}$.
 Son équation-bilan est : $^A_Z\text{X} \rightarrow ^A_{Z+1}\text{Y} + ^0_{-1}\text{e}$. C'est un neutron qui se transforme en proton.
 - La radioactivité β^+ correspond à la transformation d'un noyau avec émission d'un positon $^0_{+1}\text{e}$.
 Son équation-bilan est : $^A_Z\text{X} \rightarrow ^A_{Z-1}\text{Y} + ^0_{+1}\text{e}$. C'est un proton qui se transforme en neutron.
 - Le rayonnement γ accompagne les radioactivités α , β^+ et β^- .
 Son équation-bilan : $^A_Z\text{X}^* \rightarrow ^A_Z\text{X} + ^0_0\gamma$.
- Toutes les réactions nucléaires obéissent aux lois de conservation du nombre de charge Z et du nombre de masse A .
- Le nombre d'atomes d'un échantillon diminue en fonction du temps. Ainsi, le nombre N d'atomes restant à l'instant t est relié au nombre initial N_0 d'atomes par : $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$
 λ est une constante qui dépend du nucléide étudié ; on l'appelle constante radioactive ; elle s'exprime en s^{-1} .
- La période radioactive T (ou demi-vie) d'un nucléide est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux radioactifs initialement présents se sont désintégrés.

Relation entre constante radioactive et période radioactive : $T = \frac{\ln 2}{\lambda}$.

- L'activité A d'une substance radioactive représente le nombre moyen de désintégrations par seconde :
 $A = \lambda N$. Dans le système international d'unités, l'activité s'exprime en becquerel, de symbole Bq :
 $1 \text{ Bq} = 1 \text{ désintégration par seconde}$.
- On date un échantillon ancien à partir de la mesure de l'activité du carbone 14 contenu dans l'échantillon ancien d'une part, et dans l'échantillon actuel de même nature d'autre part. On obtient :

$$t = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{A}{A_0}$$

III- MÉTHODES

- L'écart énergétique entre deux niveaux est égal à l'énergie cinétique de la particule émise lors de la transformation ou à l'énergie du photon produit.
- Pour les unités : si la constante radioactive λ est en s^{-1} , le temps t doit obligatoirement être en secondes.
- On peut aussi exprimer λ en jours^{-1} , mais t doit maintenant être en jours.

IV- EXERCICES RÉSOLUS

Exercice 1

- On considère le nucléide suivant : ${}^{33}_{16}\text{S}$.
 - Nomme l'élément chimique ainsi symbolisé.
 - Dis si cette représentation est celle d'un noyau, d'un atome ou d'un ion.
 - Dis ce que représente le couple de valeurs (33 ; 16).
- On donne les sept (07) représentations suivantes : ${}^{30}_{14}\text{Si}$; ${}^{32}_{14}\text{Si}$; ${}^{40}_{20}\text{Ca}$; ${}^{30}_{16}\text{Si}$; ${}^{32}_{16}\text{S}$; ${}^{37}_{17}\text{Cl}$; ${}^{27}_{13}\text{Al}$.
 - Explique ce que signifie isotope.
 - Parmi les sept (07) représentations, indique celle(s) qui est (sont) isotope(s) de ${}^{33}_{16}\text{S}$.
 - Indique ensuite, s'il y en a, celles qui sont isotopes entre elles.

Exercice 2

Le thorium ${}^{227}_{90}\text{Th}$ est radioactif émetteur α .

- Écris l'équation-bilan de sa désintégration radioactive sachant qu'elle conduit au radium Ra.
- La période ou demi-vie du thorium 227 vaut : $T = 18,3$ jours. Calcule l'activité radioactive A_0 d'un échantillon de masse 1 mg de thorium ${}^{227}_{90}\text{Th}$.
- Détermine la masse m de thorium 227 de l'échantillon considéré qui a disparu au bout de 36 heures. Déduis-en l'activité A de l'échantillon.

Donnée : Nombre d'Avogadro : $N = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

Résolution de l'exercice 1

- Soit la représentation ${}^{33}_{16}\text{S}$.
 - L'élément chimique ainsi symbolisé est le soufre.
 - La représentation est celle d'un noyau.
 - Le couple de valeurs (33 ; 16) est tel que : $A = 33$ et $Z = 16$.
- Isotope : même Z et A différent.
 - Parmi les sept représentations seul ${}^{32}_{16}\text{S}$ est isotope de ${}^{33}_{16}\text{S}$.
 - ${}^{30}_{14}\text{Si}$ et ${}^{32}_{14}\text{Si}$ sont isotopes.

Commentaire :

Connaître les définitions des termes : l'élément chimique, les constituants du noyau, l'isotopie.

Résolution de l'exercice 2

a) Équation-bilan de la désintégration radioactive :

Soit : ${}^{227}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^A_Z\text{X}$ l'équation de la réaction

On a X qui correspond à Ra.

Appliquons les lois de conservations pour déterminer A et Z : $\begin{cases} 227 = 4 + A ; A = 223 \\ 90 = 2 + Z ; Z = 88 \end{cases}$

D'où l'équation-bilan ${}^{227}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{223}_{88}\text{Ra}$

b) Calculons l'activité radioactive A_0 : On a : $A_0 = \lambda N_0$.

Déterminons :

- La constante λ : $\lambda = \frac{\ln 2}{T} = \frac{0,693}{18,3 \times 24 \times 3600} = 4,38 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$;

- Le nombre de noyau N_0 : $N_0 = \frac{m}{M} \cdot N$

$\Rightarrow N_0 = \frac{10^{-3}}{227} \times 6,02 \cdot 10^{23} = 2,65 \cdot 10^{18}$ noyaux

d'où $A_0 = 4,38 \cdot 10^{-7} \times 2,65 \cdot 10^{18}$

$A_0 = 1,16 \cdot 10^{12} \text{ Bq}$.

c) Déterminons la masse de thorium 227 de l'échantillon considéré qui a disparu :

Posons $m = m_0 \cdot e^{-\lambda t}$ avec $t = 36 \text{ h} = 36 \times 3600 \text{ s} = 1,30 \cdot 10^5 \text{ s}$

AN : $m = 1 \times e^{-4,38 \cdot 10^{-7} \times 1,30 \cdot 10^5} \times 1,30 \cdot 10^5 = 0,945 \text{ mg}$.

Déduisons l'activité de l'échantillon :

Posons : $\begin{cases} A = \lambda \cdot A_0 \\ m = \lambda \cdot m_0 \end{cases} \Rightarrow \frac{A}{A_0} = \frac{m}{m_0} = \lambda \text{ d'où } A = \frac{m}{m_0} \times A_0$

AN : $A = \frac{0,945}{1} \times 1,16 \cdot 10^{12} = 1,10 \cdot 10^{12} \text{ Bq}$.

Commentaire :

La connaissance des lois de conservation est nécessaire pour réussir l'écriture de l'équation-bilan.

Pour la suite, en plus de la maîtrise des formules, il faut savoir que la masse de l'échantillon actuel donnée, amène à calculer sa quantité de matière pour la détermination de la quantité de noyaux disparus, en tenant compte de la constante d'Avogadro.

V- JE M'EXERCE

Exercices de fixation/ Application

1 Le polonium ${}^{210}_{84}\text{Po}$ a une constante radioactive $\lambda = 5,8 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$.

Calcule en secondes et en jours, la période radioactive T.

2

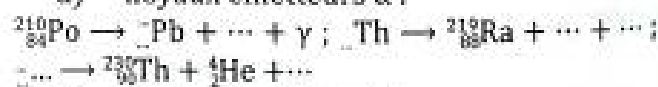
1- Écris l'équation-bilan de la désintégration du radium ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ sachant qu'un noyau de cet élément émet une particule α .

2- Explique la phrase : « la demi-vie du radioélément ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ est 1620 ans »

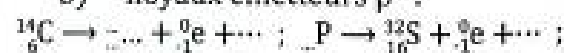
Extrait de la classification périodique des éléments :
 ${}_{84}\text{Po}$; ${}_{85}\text{At}$; ${}_{86}\text{Rn}$; ${}_{87}\text{Fr}$; ${}_{88}\text{Ra}$; ${}_{89}\text{Ac}$; ${}_{90}\text{Th}$.

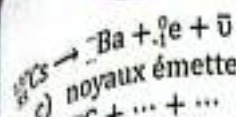
3 Recopie et complète les équations-bilans suivantes :

a) noyaux émetteurs α :

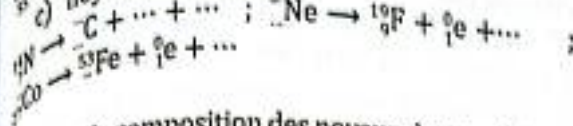


b) noyaux émetteurs β^- :

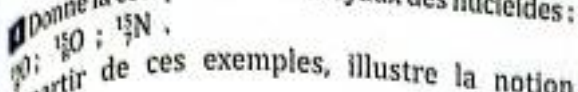




c) noyaux émetteurs β^+ :



d) noyaux émetteurs β^- :



1- Donne la composition des noyaux des nucléides :

2- À partir de ces exemples, illustre la notion d'isotopie.

3- Le noyau de l'atome de sodium a pour symbole :

- 1- Dis ce que représentent les nombres 11 et 23.
- 2- Donne le nombre d'électrons que contient le cortège électronique de cet atome.

4- La désintégration β^+ d'un nucléide inconnu X donne le néon.

- 1- Écris son équation de désintégration.
- 2- Donne le nom du noyau père X.

Exercices de renforcement / Approfondissement

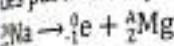
1- Le phosphore ^{32}P est radioactif β^- .

- 1- Écris l'équation-bilan de sa désintégration (le noyau fils est du soufre).
- 2- La période radioactive du phosphore 32 est égale à $T = 14,3$ jours.
 - 2.1- Définis la période d'un nucléide radioactif.
 - 2.2- Détermine la constante radioactive du phosphore 32.

2- L'isotope 210 du polonium ^{210}Po est un élément radioactif de type α .

- 1- Donne la constitution du noyau de cet atome.
- 2- Explique en quoi consiste la radioactivité α .
- 3- Écris l'équation-bilan de désintégration sachant que le noyau fils obtenu est le ^{82}Pb .

3- Le noyau de sodium ^{24}Na est radioactif. Il émet des particules β^- suivant la réaction nucléaire :



- 1- Détermine les nombres A et Z en précisant les lois de conservation utilisées.
- 2- La période radioactive ou demi-vie de ce nucléide est $T = 15$ heures.
 - 2.1- Détermine la constante λ radioactive de ce nucléide.
 - 2.2- Si N_0 est le nombre de noyaux à l'instant

$t = 0$, détermine le nombre de noyaux restant au bout de 15 heures et au bout de 30 heures.

4- La demi-vie du carbone ^{14}C est de 5 590 années. Un échantillon de bois trouvé dans une grotte préhistorique donne 212 désintégrations par minute. Un même échantillon contenant la même masse de carbone et préparé à partir d'un jeune bois donne 1 350 désintégrations par minute.

Détermine l'âge du bois ancien.

5- La désintégration du thorium 232 dont la période est $1,4 \cdot 10^{10}$ ans donne comme terme final, le plomb 208. Pour 1 g de thorium 232, on a trouvé 0,05 g de plomb 208 dans une roche. Détermine l'âge de la roche, en admettant que le plomb trouvé provient entièrement du thorium.

6- Par une série de transformations radioactives, l'uranium ^{238}U se transforme en plomb ^{206}Pb ; certaines étapes correspondent à une radioactivité α , les autres à une radioactivité β^- .

Écris l'équation-bilan de la transformation globale et détermine le nombre des particules α et β^- émises.

Situations d'évaluation

7- Regardant un documentaire scientifique à la télévision, tu apprends les informations suivantes : « Le potassium 40 (^{40}K) est un atome radioactif présent dans la nature. Le corps humain contient 42 mol de potassium, dont seulement 0,01167 % est du potassium 40 radioactif. Le potassium 40 se désintègre en subissant une désintégration β^- . La période radioactive du potassium 40 vaut 1,248 milliard d'années ». Ton professeur te demande d'exploiter les données du texte ci-dessus.

- 1- Définis :
 - 1.1- la période radioactive T ;
 - 1.2- l'activité A de l'échantillon.
- 2- Détermine :
 - 2.1- la masse de potassium dans le corps humain ;
 - 2.2- la masse de potassium radioactif dans le corps humain.
- 3- Écris l'équation-bilan de la désintégration du potassium.

4- Détermine l'activité A de l'échantillon d'un gramme de potassium 40 ;
Données : ${}_{20}\text{Ca}$ et ${}_{18}\text{Ar}$; $M({}_{19}^{40}\text{K}) = 40 \text{ g/mol}$ (potassium radioactif) ; $M({}_{19}^{39}\text{K}) = 39 \text{ g/mol}$ (potassium non radioactif).

14 Tu apprends en suivant une émission sur la science que le césium (Cs) 137 est utilisé dans le traitement in situ du cancer du col de l'utérus. Le traitement consiste à soumettre une patiente à un échantillon de césium 137 (${}_{55}^{137}\text{Cs}$) pendant quelques jours. La constante radioactive de ces noyaux est $\lambda = 7,3 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}$. L'activité A_0 d'un échantillon de cet isotope est $3 \cdot 10^5 \text{ Bq}$. Le césium 137 est émetteur β^- et γ .

Tu es invité(e) à exploiter les données de l'émission.

- 1- Donne :
 - 1.1- les règles de conservation lors d'une désintégration nucléaire ;
 - 1.2- la définition de temps de demi-vie ;
 - 1.3- l'expression de l'activité $A(t)$ à un instant t en fonction de A_0 , du temps t et de la constante λ .
 - 2- Écris l'équation-bilan de la désintégration du césium 137.
 - 3- Détermine la demie-vie T .
 - 4- Trace l'allure de la courbe donnant l'activité $A(t)$ en fonction du temps tout en précisant les points particuliers.
- Données : ${}_{54}\text{Xe}$ et ${}_{56}\text{Ba}$.

15 L'yttrium est un élément de symbole Y. Il appartient à la famille des « métaux de transition ».

L'isotope 95 de l'yttrium est radioactif β^- . Il est obtenu par l'impact d'un neutron sur un noyau d'Uranium 235 : ${}^1_0n + {}^{235}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{95}_{39}\text{Y} + {}^{141}_{53}\text{I} + 2 {}^1_0n$. La période ou demi-vie de l'isotope ${}^{95}_{39}\text{Y}$ est $T = 10 \text{ min}$. Un échantillon de cet isotope contient initialement une masse $m_0 = 0,1898 \text{ mg}$ d'yttrium 95. Le nombre de noyaux d'yttrium 95, à la date t , est donné par : $N = N_0 e^{-\lambda t}$.

- Données :
- Nombre d'Avogadro : $N = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$;
 - Masse atomique molaire de l'yttrium 95 : $M = 95 \text{ g/mol}$;
 - Extrait du tableau de classification périodique des éléments :

${}_{37}\text{Rb}$	${}_{38}\text{Sr}$	${}_{39}\text{Y}$	${}_{40}\text{Zr}$	${}_{41}\text{Nb}$
--------------------	--------------------	-------------------	--------------------	--------------------

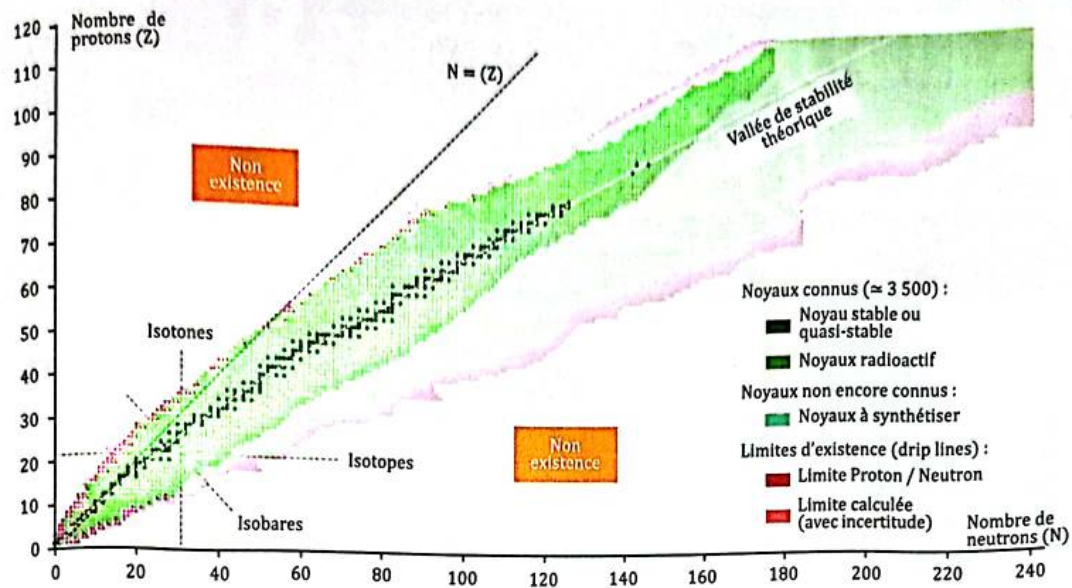
Tu es sollicité(e) pour évaluer la masse d'yttrium désintégré.

- 1- Détermine les valeurs de A et Z .
- 2- Écris l'équation de la désintégration de l'isotope 95 de l'yttrium.
- 3- Représente qualitativement la courbe $N(t)$ donnant les variations du nombre de noyaux en fonction du temps. On utilisera, pour cette représentation, les points remarquables suivants : $t = 0$; $t = T$; $t = 2T$; $t = 3T$ et $t = 4T$.
(T étant la période de l'isotope ${}^{95}_{39}\text{Y}$).
- 4- Détermine :
 - 4.1- l'activité initiale A_0 de l'échantillon ;
 - 4.2- la masse m d'yttrium désintégrée au bout d'une heure.

VI- RENDEZ-VOUS DES CURIEUX

Étendue de la physique nucléaire

La physique nucléaire a engendré en un siècle, une série inimaginable de retombées techniques, économiques, politiques et, bien entendu, scientifiques jusqu'à la physique des particules élémentaires et des interactions fondamentales, dont on a, paradoxalement, une théorie plus complète que de la physique des noyaux elle-même. Les noyaux atomiques sont des systèmes de protons et de neutrons, de masses voisines, liés par les forces nucléaires. Du point de vue nucléaire, en faisant abstraction de l'électromagnétisme, le proton et le neutron, de masse voisine, sont des « jumeaux nucléaires ». Il existe des milliers de noyaux différents, 1700 si l'on ne considère que les noyaux usuels connus dans la nature, alors qu'il n'existe qu'une centaine d'atomes. Une des courses aux records du monde actuel consiste à synthétiser des noyaux lourds instables (on est arrivé en 1999 à la région « mythique » pour les physiciens nucléaires, des éléments $Z = 114$ et 126 que la théorie prévoit être particulièrement stables).



RÉACTIONS NUCLÉAIRES PROVOQUÉES

TABLEAU DES HABILETÉS ET DES CONTENUS

HABILETÉS	CONTENUS
Expliquer	le défaut de masse
Définir	l'unité de défaut de masse
Connaître	- l'énergie de liaison E_L - l'énergie de liaison par nucléon E_n
Définir	les relations $E_L = \Delta m \cdot c^2$ et $E_n = \frac{\Delta m \cdot c^2}{A}$
Utiliser	les spectres atomiques (spectres d'émission et d'absorption).
Définir	- une fission nucléaire. - une fusion nucléaire.
Citer	- des exemples de fissions nucléaires. - des exemples de fusions nucléaires.
Écrire	- l'équation-bilan d'une fission nucléaire. - l'équation-bilan d'une fusion nucléaire.
Connaître	- les applications de la radioactivité. - les dangers de la radioactivité.

NOTIONS ESSENTIELLES

- Défaut de masse ;
- Énergie de liaison ;
- Énergie de liaison par nucléon ;
- Fission ;
- Fusion.

SITUATION D'APPRENTISSAGE

En écoutant une discussion entre son grand frère et son voisin d'amphithéâtre, une élève en classe de Terminale D entend ceci : « d'autres réactions nucléaires, mettant en jeu des chocs, font également apparaître des noyaux différents : ce sont des réactions de transmutation ou réactions nucléaires provoquées ». Impressionnée par ce que disent ces étudiants en physique atomique et nucléaire, elle informe ses camarades de classe. Ensemble, sous la supervision de leur professeur, les élèves décident de déterminer le défaut de masse, de définir l'énergie de liaison par nucléon, les réactions nucléaires provoquées puis de connaître les applications et les dangers de la radioactivité.



I- ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1 : DÉFINIR LE DÉFAUT DE MASSE D'UN ATOME

L'atome d'oxygène 16 a pour masse $m = 15,9994 \text{ u}$. Les masses des nucléons sont :

$$m_p = 1,67262 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,007\,276\,5 \text{ u}$$

$$m_n = 1,674\,927\,471 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,008\,664\,915\,88 \text{ u}.$$

- 1- Calcule la masse des nucléons de l'atome d'oxygène 16.
- 2- Compare cette masse à la masse de l'atome et conclus.
- 3- Définis le défaut de masse d'un atome.



Document 1 : Symbole de l'atome d'oxygène

Je fais le point de l'activité

1- Masses des nucléons de l'atome

La masse des nucléons de l'atome d'oxygène 16 est :

$$[Z \times m_p + (A - Z) \times m_n] = [8 \times 1,007\,276\,5 + (16 - 8) \times 1,008\,664\,915\,88]$$

$$[Z \times m_p + (A - Z) \times m_n] = 16,12753132704 \text{ u}$$

2- Comparaison avec la masse de l'atome et conclusion

La masse de l'atome d'oxygène 16 est $m = 15,9994 \text{ u}$.

On note que cette masse est inférieure à la masse des nucléons de l'atome.

$m < [Z \times m_p + (A - Z) \times m_n]$. Il en est de même pour tous les atomes.

On dit qu'il existe un défaut de masses dans l'atome.

3- Définition du défaut de masse

Le défaut de masse Δm du noyau est la différence entre la somme des masses des nucléons et la masse du noyau : $\Delta m = [Z \times m_p + (A - Z) \times m_n] - m(^A_Z\text{X})$.

Δm est toujours positif et s'exprime en MeV/c^2 .

J'évalue mes acquis



- 1- Définis le défaut de masse.
- 2- Détermine le défaut de masse Δm dans le cas du noyau ^1_1H .

ACTIVITÉ 2 : DÉFINIR L'ÉNERGIE DE LIAISON

1- Définis :

- l'énergie de liaison d'un noyau E_l ;
- l'énergie de liaison par nucléon E_a .

2- Donne l'expression de chacune de ces énergies.

Je fais le point de l'activité

- L'énergie de liaison notée E_l est l'énergie qu'il faut fournir pour séparer les nucléons d'un noyau au repos.

Son expression est : $E_l = \Delta m \cdot c^2$. $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

- L'énergie de liaison par nucléon E_a est le rapport de l'énergie de liaison E_l par le nombre de masse A du noyau. On a donc : $E_a = \frac{E_l}{A}$; $E_a = \frac{\Delta m \cdot c^2}{A}$

Un nucléide est d'autant plus stable que son énergie de liaison par nucléon E_a est élevée.

On exprime E_l en MeV et E_a en MeV/nucléon

La masse du proton est égale à environ $1,007\,276\,5 \text{ u}$, soit à peu près $938,272\,0 \text{ MeV}/c^2$

La masse du neutron est égale à environ $1,008\,665\,491\,6 \text{ u}$, soit à peu près $939,565\,379 \text{ MeV}/c^2$

J'évalue mes acquis



Détermine l'énergie de liaison par nucléon pour le noyau $^{16}_8\text{O}$.

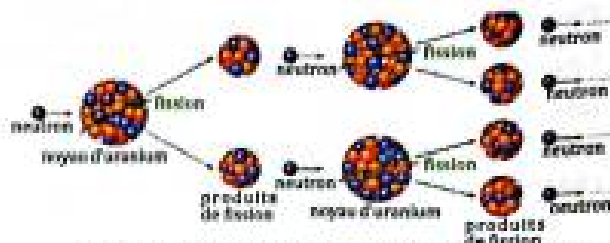
On donne :

- masse du proton : $m_p = 938,3 \text{ MeV}/c^2$;
- masse du neutron : $m_n = 939,6 \text{ MeV}/c^2$;
- masse du noyau $^{16}_8\text{O}$: $15,995 \text{ u}$ et $1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$.

ACTIVITÉ 3 : DÉFINIR LA RÉACTION DE FISSION

Informe-toi sur les réactions nucléaires provoquées et observe le document 2. Celui-ci décrit la fission nucléaire.

- 1- Définis la fission nucléaire.
- 2- Donne quelques exemples de réactions de fission nucléaire.
- 3- Écris les équations-bilans de ces réactions nucléaires.



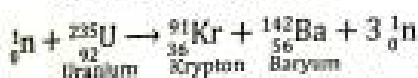
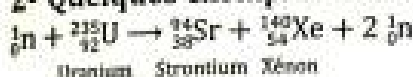
Document 2 : Schéma d'une fission nucléaire

Je fais le point de l'activité

1- Définition

La fission est une réaction nucléaire provoquée, consistant en la cassure d'un noyau lourd en deux noyaux légers sous l'action d'un neutron lent. Une fission produit des neutrons. C'est une réaction nucléaire provoquée qui s'observe, en particulier, avec l'uranium 235.

2- Quelques exemples de réactions de fission



Le nucléide lourd qui subit la fission est dit fissile. Actuellement, quatre (04) nucléides fissiles sont utilisés ; ce sont le nucléide naturel ($^{235}_{92}\text{U}$) et les nucléides artificiels ($^{233}_{92}\text{U}$; $^{239}_{94}\text{Pu}$ et $^{241}_{94}\text{Pu}$). Le nucléide fissile peut être engendré, par réaction nucléaire, par un nucléide dit fertile tel que ^{238}U . Les réactions de fissions sont très énergétiques.

12

J'évalue mes acquis



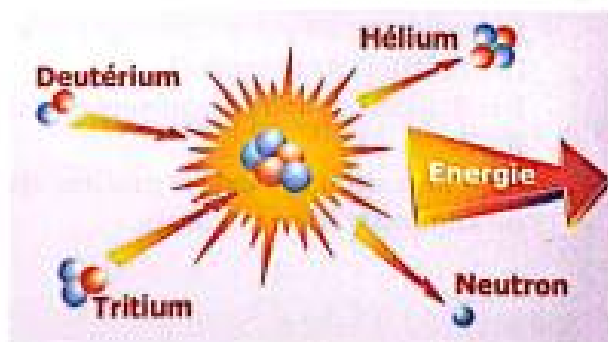
L'uranium bombardé par un neutron produit du xénon, un autre noyau inconnu Y et deux neutrons.

- 1- Écris l'équation-bilan de la réaction de fission.
- 2- Nomme le noyau inconnu Y.

ACTIVITÉ 4 : DÉFINIR LA RÉACTION DE FUSION

Observe le document 3. Celui-ci décrit la fusion nucléaire.

- 1- Définis la fusion nucléaire.
- 2- Donne quelques exemples de réactions de fusion nucléaire.
- 3- Écris les équations-bilans de ces réactions nucléaires.



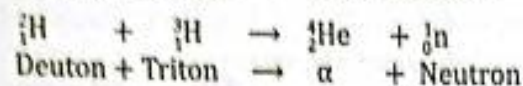
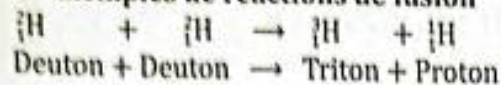
Document 3 : Schéma d'une fusion nucléaire

Je fais le point de l'activité

1- Définition

Il y a fusion lorsque, au cours d'une réaction nucléaire provoquée, deux noyaux légers s'unissent et forment un noyau plus lourd.

2- Exemples de réactions de fusion



Les réactions de fusion sont très fortement exoénergétiques. Elles ne peuvent se dérouler qu'à très haute température (environ 10^8 K).

C'est la fusion d'hydrogène en hélium qui est à l'origine de l'énergie solaire. Le Soleil est un énorme réacteur thermonucléaire. L'équation-bilan de la réaction est : $4 {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2 {}^0_{-1}\text{e} + 2 \nu_e$

J'évalue mes acquis



Deux isotopes de l'hydrogène dont le deutérium s'assemblent pour donner le noyau d'hélium et un neutron.

- 1- Écris l'équation-bilan de la réaction de fusion.
- 2- Détermine le symbole chimique et le nom de l'autre isotope.

ACTIVITÉ 5 : DÉCOUVRIR LES APPLICATIONS ET LES DANGERS DE LA RADIOACTIVITÉ.

Documente-toi.

- 1- Cite quelques applications de la radioactivité.
- 2- Dégage quelques dangers de la radioactivité.

Je fais le point de l'activité

1- Les applications de la radioactivité

Les rayonnements peuvent être utilisés de différentes manières :

- Dans l'agriculture, la radioactivité permet de suivre la migration du phosphore dans les feuilles d'une plante.
- En médecine, la radioactivité permet d'étudier des organes. On peut également par la radiothérapie traiter les cancers.
- Industriellement, la radioactivité sert à vérifier les soudures d'une canalisation métallique, à localiser une fuite dans un pipe-line.
- La radioactivité permet la conservation de denrées alimentaires.

2- Les dangers de la radioactivité

- La radioactivité est accompagnée de l'émission de particules ionisantes capables d'altérer l'ADN (effet cancérogène).
- Irradiation : quand l'organisme est exposé à un rayonnement inhabituel, intense et de courte durée.
- Contamination : quand l'organisme absorbe un échantillon radioactif, par ingestion, inhalation ou administration médicale.



II- RÉSUMÉ DE COURS

• Notion de défaut de masse

On appelle défaut de masse, la différence entre la somme des masses des nucléons et la masse du noyau.
 $\Delta m = [Z \times m_p + (A - Z) \times m_n] - m({}_Z^AX)$.

• Énergie de liaison du noyau

L'énergie de liaison d'un noyau notée E_l est l'énergie qu'il faut fournir au noyau pour que ses nucléons se séparent en protons et neutrons. Elle a pour expression : $E_l = \Delta m \cdot c^2$; avec $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

• Énergie de liaison par nucléons

C'est le rapport ou le quotient de E_l par son nombre de masse A . Elle se note E_a : $E_a = \frac{E_l}{A}$
 $\Rightarrow E_a = \frac{\Delta m \cdot c^2}{A}$.

• La fission nucléaire

Une réaction de fission est une réaction nucléaire au cours de laquelle un noyau cible plus lourd bombardé par un neutron se scinde en deux autres noyaux plus légers.

• La fusion nucléaire

On appelle réaction de fusion, une réaction nucléaire provoquée au cours de laquelle des noyaux légers s'assemblent pour donner un noyau plus lourd.

• Les applications et les dangers des réactions nucléaires

La radioactivité est utilisée positivement en médecine pour réaliser l'imagerie, la radiographie, le scanner etc..., en industrie pour la production d'énergie, comme traceurs en agriculture et pour la datation et le marquage en science.

Les essais nucléaires, les bombes nucléaires, les déchets radioactifs et les accidents dûs aux réactions nucléaires sont dangereux pour l'environnement et les êtres vivants.

III- MÉTHODES

- L'énergie de liaison par nucléon des noyaux stables est supérieure à 8 MeV/nucléon.
- Comme pour toute autre transformation nucléaire, il y a conservation du nombre de masse et du nombre de charge lors d'une fission ou d'une fusion nucléaire.

IV- EXERCICES RÉSOLUS

Exercice 1

Détermine l'énergie de liaison par nucléon pour le noyau de lithium ${}^7_3\text{Li}$.

On donne :

- masse du proton : $m_p = 1,00727 \text{ u}$;
- masse du neutron : $m_n = 1,00866 \text{ u}$;
- masse du noyau de lithium : $m = 7,01601 \text{ u}$;
- nombre d'avogadro : $N = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$;
- célérité de la lumière dans le vide : $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$;
- $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$;
- $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

Exercice 2

Détermine l'énergie de liaison du noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$ dont la masse déduite des indications des tables de valeurs est $m = 4,0015 \text{ u}$.

On donne : $m_p = 1,007276 \text{ u}$; $m_n = 1,008664 \text{ u}$ et $1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$.

Exercice 3

On considère les trois noyaux suivants : ${}^{238}_{92}\text{U}$; ${}^{234}_{90}\text{Th}$ et ${}^{206}_{82}\text{Pb}$.

- 1- Définis l'énergie de liaison d'un noyau.
- 2- Détermine, pour chacun d'eux, l'énergie de liaison par nucléon exprimée en MeV/nucléon.
- 3- Indique, en le justifiant, lequel de ces trois noyaux est le plus instable.

On donne : $1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$; $m(\text{Pb}) = 206,92905 \text{ u}$; $m(\text{Th}) = 233,99422 \text{ u}$ et $m(\text{U}) = 238,00031 \text{ u}$

Résolution de l'exercice 1

Calculons l'énergie de liaison par nucléon du lithium 7.

- L'énergie de liaison est : $E_L = \Delta m \times c^2 = [(Z \times m_p + (A - Z) \times m_n) - m] \times c^2$

- $\Delta m = [(3 \times m_p + (7 - 3) \times m_n) - m]$

$$\Delta m = [(3 \times 1,00727 + 4 \times 1,00866) - 7,01601] = 0,04044 \text{ u}$$

En kilogramme $\Delta m = 0,04044 \times 1,66 \cdot 10^{-27} = 6,71 \cdot 10^{-29} \text{ kg}$

$$\text{Donc } E_L = 6,71 \cdot 10^{-29} \times (3 \cdot 10^8)^2 = 6,039 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$

$$\text{En électronvolts : } E_L = \frac{6,039 \cdot 10^{-12}}{1,60 \cdot 10^{-19}} = 3,77 \cdot 10^7 \text{ eV soit } 37,7 \text{ MeV}$$

- Enfin l'énergie de liaison par nucléon est : $E_a = \frac{E_L}{A}$; AN : $E_a = \frac{37,7}{7} = 5,4 \text{ MeV/nucléon}$.

Commentaire :

Cet exercice nécessite la connaissance des formules de l'énergie de liaison du noyau et de l'énergie de liaison par nucléon. Il est aussi nécessaire de maîtriser les unités des grandeurs physiques.

Résolution de l'exercice 2

Calculons l'énergie de liaison du noyau d'hélium 4

$$\text{Posons : } E_L = \Delta m \times c^2 = [(Z \times m_p + (A - Z) \times m_n) - m] \times c^2$$

$$\text{Alors } \Delta m = [(2 \times m_p + (4 - 2) \times m_n) - m]$$

$$\text{AN : } \Delta m = [(2 \times 1,007276 + 2 \times 1,008664) - 4,0015] = 0,03038 \text{ u}$$

$$\text{En MeV}/c^2 : \Delta m = 0,03038 \times 931,5 = 28,29897 \text{ MeV}/c^2$$

$$\text{Donc } E_f = \left(\frac{28,29897 \text{ MeV}}{c^2} \right) \times c^2 = 28,29897 \text{ MeV.}$$

Commentaire :

Comme dans l'exercice précédent, il faut connaître la formule de l'énergie de liaison et maîtriser les unités des grandeurs physiques.

Résolution de l'exercice 3

- 1- L'énergie de liaison E_f est l'énergie qu'il faut fournir pour séparer les nucléons d'un noyau au repos.
- 2- Énergie de liaison par nucléon de chacun des noyaux :

$$E = \frac{E_f}{A} \text{ avec } E_f = [(Zm_p + (A - Z)m_n) - m(X)] \cdot c^2$$

$$E(U) = \frac{[(92 \times 1,00727 + 146 \times 1,00866) - 238,00031] \times 931,5}{238} = 7,570 \text{ MeV/nucléon ;}$$

$$E(\text{Th}) = \frac{[(90 \times 1,00727 + 144 \times 1,00866) - 233,99422] \times 931,5}{234} = 7,592 \text{ MeV /nucléon ;}$$

$$E(\text{Pb}) = \frac{[(82 \times 1,00727 + 124 \times 1,00866) - 206,92905] \times 931,5}{206} = 7,350 \text{ MeV /nucléon.}$$

- 3- Comme l'énergie de liaison par nucléon du plomb est la plus faible donc ce noyau est le plus instable parmi les trois étudiés.

Commentaire :

Comme dans les exercices précédents, il faut se référer aux définitions et aux unités des grandeurs physiques de la leçon.

V- JE M'EXERCE**Exercices de fixation/ Application**

Données pour tous les exercices : charge élémentaire : $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; unité de masse atomique : $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; célérité de la lumière dans le vide : $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$; nombre d'Avogadro : $N = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

1 Définis :

- a) le défaut de masse Δm d'un noyau ;
- b) l'énergie de liaison E_f d'un noyau ;
- c) l'énergie de liaison E_a par nucléon d'un noyau.

2 Reproduis les diagrammes puis relie chaque élément du diagramme A à un élément du diagramme B :

A		B
$2_1^1\text{H} + 3_1^1\text{H} \rightarrow 4_2^4\text{He} + 1_0^1\text{n}$	•	• fission nucléaire
$124_{53}^1\text{I} \rightarrow 124_{54}^1\text{Xe} + 0_{-1}^0\text{e}$	•	• radioactivité β^-
$124_{53}^1\text{I} \rightarrow 124_{52}^1\text{Te} + 0_{+1}^0\text{e}$	•	• radioactivité α
$3_2^3\text{He} + 3_2^3\text{He} \rightarrow 4_2^4\text{He} + 2 \cdot 1_1^1\text{H}$	•	• radioactivité β^+
$235_{92}^1\text{U} + 1_0^1\text{n} \rightarrow 94_{39}^1\text{Y} + 139_{53}^1\text{I} + 3 \cdot 1_0^1\text{n}$	•	• fusion nucléaire

3 Définis :

- 1- une fission nucléaire ;
- 2- une fusion nucléaire.

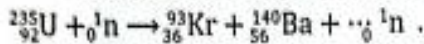
4 Recopie et complète les réactions et indique à côté, pour chacune des réactions, le type (alpha, bêta- ou bêta+, fusion ou fission).

- $^{222}_{86}\text{Rn} \rightarrow ^4_2\text{He} + \dots$
- $^2_1\text{H} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^3_1\text{H} + \dots$
- $^1_0\text{n} + ^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{140}_{54}\text{Xe} + ^{94}_{38}\text{Sr} + 2\dots$
- $^{64}_{29}\text{Cu} \rightarrow ^{64}_{30}\text{Zn} + \dots$
- $^{185}_{74}\text{W} \rightarrow ^{185}_{75}\text{Re} + \dots$

5

1- Réactions de fission nucléaire

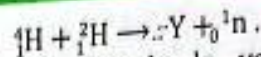
1.1- Recopie et complète l'équation de la réaction de fission de l'uranium 235.



1.2- Calcule la variation de masse puis l'énergie libérée au cours de cette réaction (en joule puis en MeV).

2- Réaction de fusion

2.1- Recopie et complète l'équation de la réaction de fusion suivante :



2.2- Calcule la variation de masse puis l'énergie libérée au cours de cette réaction (en joule puis en MeV).

Données :

Particule ou Noyau	Neutron	Deutérium	Tritium	Hélium
Symbole	^1_0n	^2_1H	^3_1H	^4_2He
Masse en u	1,0087	2,0141	3,0160	4,0026

Uranium 235	Radium 226	Radon 222	Krypton 93	Baryum 140
$^{235}_{92}\text{U}$	$^{226}_{88}\text{Ra}$	$^{222}_{86}\text{Rn}$	$^{93}_{36}\text{Kr}$	$^{140}_{56}\text{Ba}$
235,0439	226,02254	222,0176	93,8946	139,9106

Exercices de renforcement / Approfondissement

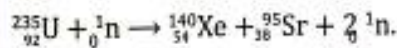
6 On considère la réaction nucléaire suivante d'équation : $^{13}_6\text{C} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{16}_8\text{O} + ^1_0\text{n}$

1- Nomme cette réaction nucléaire.

2- Détermine l'énergie libérée par la réaction.

Données : $E_f(\text{C}) = 7,6 \text{ MeV / nucléon}$; $E_f(\text{O}) = 8,0 \text{ MeV / nucléon}$; $E_f(\text{He}) = 7,1 \text{ MeV / nucléon}$.

7 Soit la réaction de fission nucléaire d'équation :



1- Définis la fission nucléaire.

2- Détermine la variation d'énergie ΔE de la réaction nucléaire.

3- Dédus le caractère (exothermique, endothermique ou athermique) de cette réaction.

Données : masse de $^{235}_{92}\text{U}$: $m_{\text{U}} = 234,9935 \text{ u}$; masse de $^{140}_{54}\text{Xe}$: $m_{\text{Xe}} = 139,892 \text{ u}$; masse de $^{94}_{38}\text{Sr}$: $m_{\text{Sr}} = 93,8945 \text{ u}$; masse de ^1_0n : $m_{\text{n}} = 1,0087 \text{ u}$; $1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV} \cdot c^{-2}$.

8 L'uranium est constitué de deux isotopes $^{235}_{92}\text{U}$ et $^{238}_{92}\text{U}$.

1- Nomme l'isotope fissile.

2- Détermine l'énergie libérée par $m = 1 \text{ g}$.

d'uranium $^{235}_{92}\text{U}$ sachant que la réaction produit en moyenne une énergie $E = 160 \text{ MeV}$.

9 On considère la réaction de fission nucléaire d'équation : $^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{140}_{54}\text{Xe} + ^{94}_{38}\text{Sr} + 3 ^1_0\text{n}$.

1- Détermine l'énergie de réaction ΔE pour 1 mole de noyau fissionné.

2- Compare cette énergie à l'énergie de combustion du carbone ($\sim 390 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$).

Données : $E_f(^{235}_{92}\text{U}) = 1785,89 \text{ MeV}$;

$E_f(^{140}_{54}\text{Xe}) = 1210,21 \text{ MeV}$;

$E_f(^{94}_{38}\text{Sr}) = 733,81 \text{ MeV}$.

10 En 1934, Frédéric et Irène Joliot-Curie ont découvert la radioactivité artificielle.

1- En bombardant des noyaux d'aluminium $^{27}_{13}\text{Al}$ par des particules α , ils ont obtenu des noyaux de phosphore $^{30}_{15}\text{P}$ et une autre particule p.

Écris l'équation-bilan de cette réaction nucléaire et nomme la particule p.

2- Le phosphore obtenu est radioactif et se désintègre en donnant des particules β^+ et du silicium Si. Écris l'équation-bilan de cette désintégration.

Situations d'évaluation

11 Le polonium $^{210}_{84}\text{Po}$ est un noyau instable qui donne par désintégration α , un noyau de plomb avec émission de rayonnement γ . Les particules α émises servent à bombarder des noyaux d'aluminium $^{27}_{13}\text{Al}$ qui se transforment en un isotope radioactif du phosphore $^{30}_{15}\text{P}$ avec émission d'une particule.

Le noyau $^{30}_{15}\text{P}$, se transforme, à son tour, en noyau stable de silicium $^{30}_{14}\text{Si}$.

1- Donne la composition du noyau de polonium.

2- Écris l'équation-bilan de désintégration du noyau de polonium.

3- Détermine en MeV :

- 3.1- l'énergie de liaison par nucléons pour le noyau de polonium ;
 3.2- l'énergie libérée au cours de cette désintégration.
 4- Écris les équations-bilans des transformations des noyaux de l'aluminium et du phosphore.
 On donne : $m_{p_0} = 210,0482 \text{ u}$; $m_{p_0} = 206,0385 \text{ u}$;
 $m_{\alpha} = 4,0015 \text{ u}$.

Des élèves apprennent dans une revue scientifique que si on bombarde une cible formée de noyau A_ZX par un faisceau de deutons (deutérium) 2_1H , on produit exclusivement du sodium ${}^{24}_{11}Na$ et celui-ci est radioactif β^- . Le faisceau de deutérium amène par seconde, sur la cible, 10^6 particules dont on suppose qu'elles sont toutes efficaces. L'expérience dure 10 minutes. Ils entreprennent de rechercher l'élément A_ZX qui peut subir une réaction de fusion pour donner le sodium et de calculer la masse du produit de désintégration du sodium 24. Eprouvant des difficultés, ils te sollicitent pour les aider.

1- Ecris l'équation-bilan :

- 1.1- de la réaction de fusion entre les noyaux A_ZX et 2_1H ;

- 1.2- de la réaction de désintégration du sodium ${}^{24}_{11}Na$.
 2- Identifie le noyau A_ZX .
 3- Détermine la masse du produit obtenu au bout des 10 minutes.

En laboratoire, les chercheurs réalisent généralement une réaction nucléaire qui consiste à unir un noyau de deutérium et un noyau de tritium. Tu apprends que cette réaction dégage une forte énergie et conduit à la formation d'un noyau d'hélium.

Tu es invité(e) à préciser le type de réaction et à évaluer l'énergie fournie.

1- Donne la nature :

- 1.1- de cette réaction nucléaire ;
 1.2- de la particule élémentaire émise.
 2- Écris l'équation-bilan de la réaction nucléaire.
 3- Détermine en MeV puis en joules l'énergie E fournie par cette réaction.

Données : $m({}^2_1H) = 2,01255 \text{ u}$; $m({}^3_1H) = 3,01550 \text{ u}$;
 $m({}^4_2He) = 4,00150 \text{ u}$; $m({}^1_0n) = 1,008665 \text{ u}$
 $1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$.

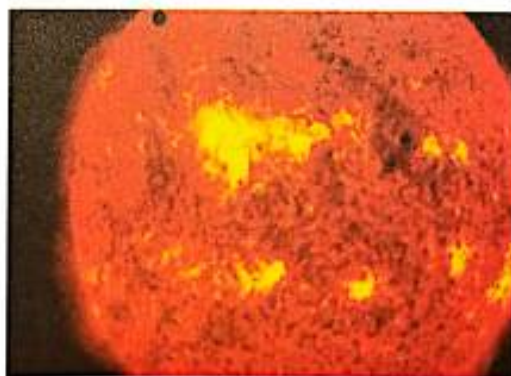
VI- RENDEZ-VOUS DES CURIEUX

La vie du soleil

Le Soleil est apparu il y a 4,6 milliards d'années. Il est depuis, stable de par sa taille et l'énergie qu'il délivre. Les réactions qui ont lieu au cœur du Soleil ne sont ni physiques ni chimiques mais nucléaires. Qu'est ce qui a permis la naissance du Soleil ?

Naissance du Soleil

En s'effondrant sous l'action de la gravité, une nébuleuse (un amas de gaz) s'échauffe pour atteindre 10 millions de degrés. Ce gaz est essentiellement constitué d'hydrogène. À cette température extrême, des réactions nucléaires permettent de modifier les noyaux d'hydrogène. Plus précisément, les noyaux d'hydrogène fusionnent pour former des noyaux d'hélium. Cette fusion nucléaire est à l'origine de l'énergie fournie par le Soleil.



PLANCHES

.....

document 1 : Mouvement rectiligne uniforme

$\tau = 50 \text{ ms}$

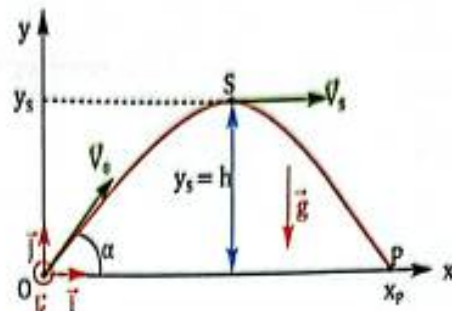
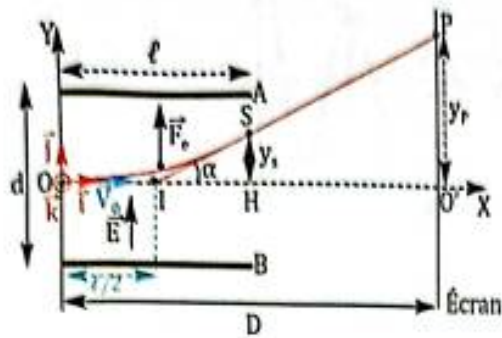
Document 2 : Mouvement rectiligne uniformément accéléré $\tau = 50 \text{ ms}$



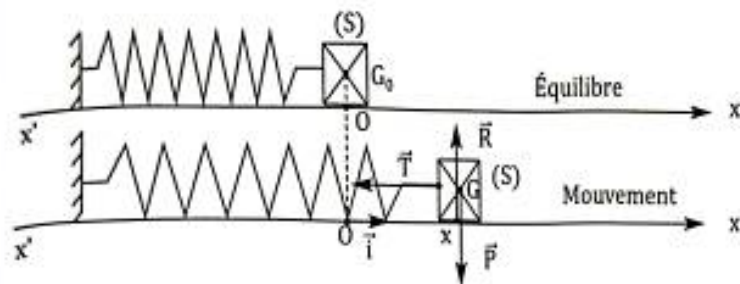
LEÇON 2 : MOUVEMENT DU CENTRE D'INERTIE D'UN SOLIDE

[illegible]

Enregistrement d'un mobile autoporteur

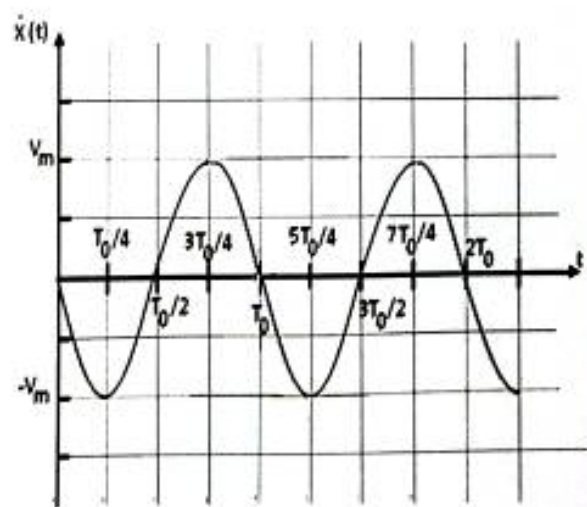
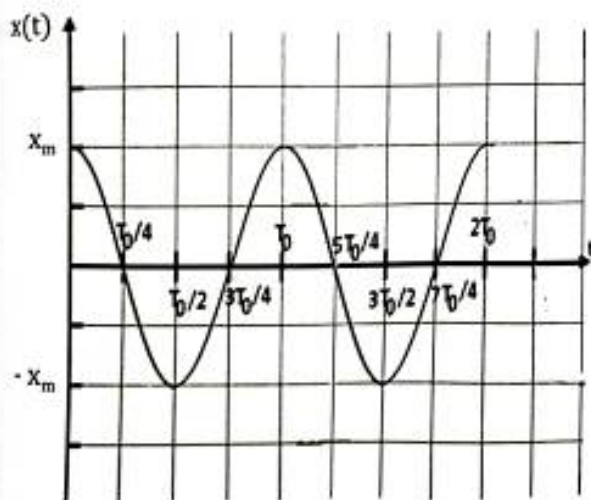


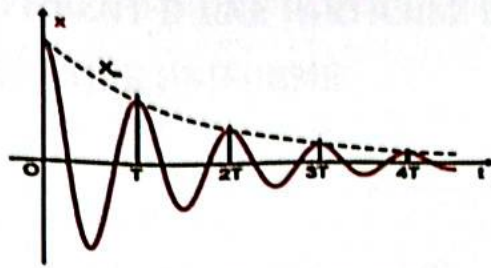
LEÇON 4 : OSCILLATIONS MÉCANIQUES LIBRES



REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DE X ET V

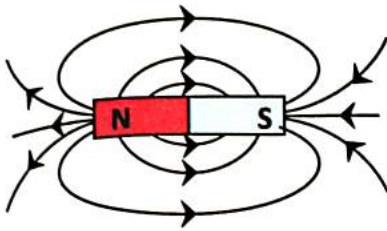
t	0	$\frac{T_0}{4}$	$\frac{T_0}{2}$	$\frac{3T_0}{4}$	T_0	$\frac{5T_0}{4}$	$\frac{3T_0}{2}$	$\frac{7T_0}{4}$	$2T_0$
x	X_m	0	$-X_m$	0	X_m	0	$-X_m$	0	X_m
$\dot{x}$	0	$-X_m\omega_0$	0	$X_m\omega_0$	0	$-X_m\omega_0$	0	$X_m\omega_0$	0





Oscillations amorties

LEÇON 5 : CHAMP MAGNÉTIQUE



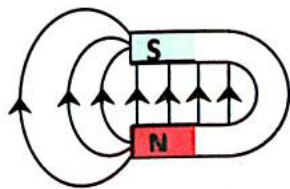
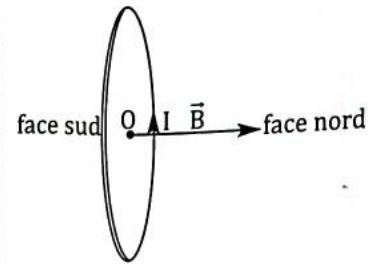
Spectre d'un aimant en droit



face Nord



face Sud



Spectre d'un aimant en U

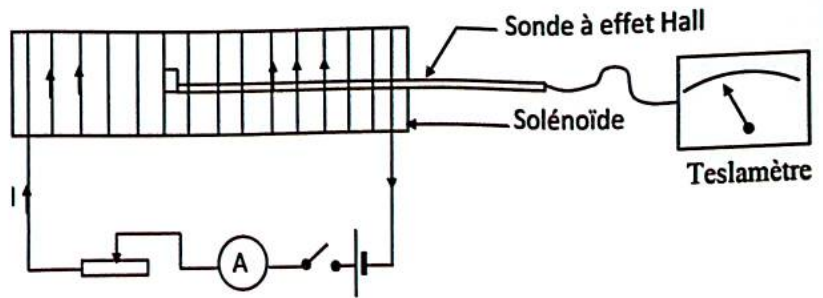
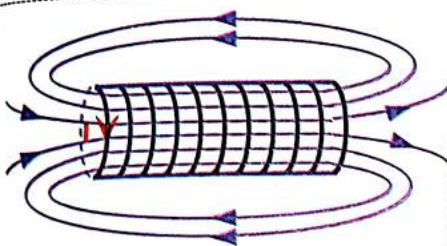
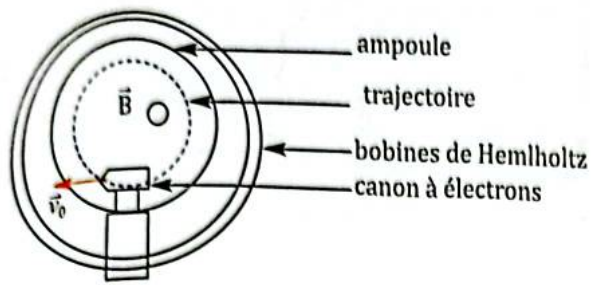


Schéma de l'expérience de détermination du champ à l'intérieure d'un solénoïde

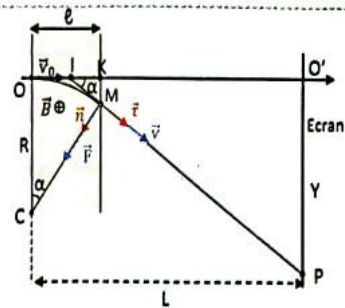
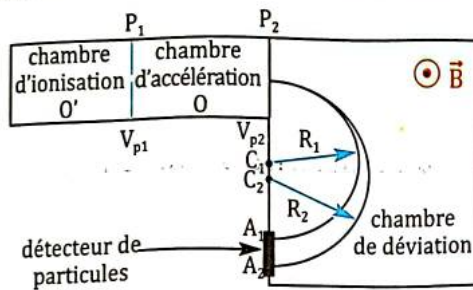
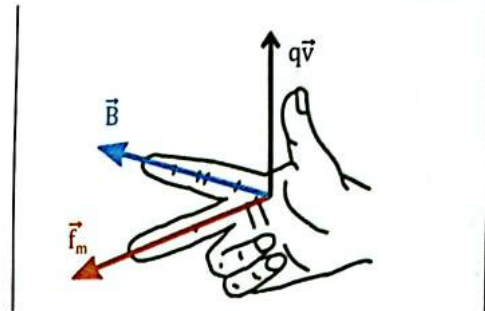
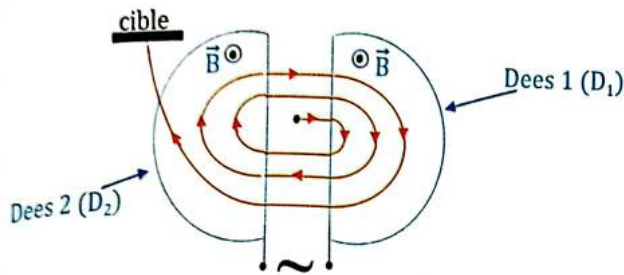
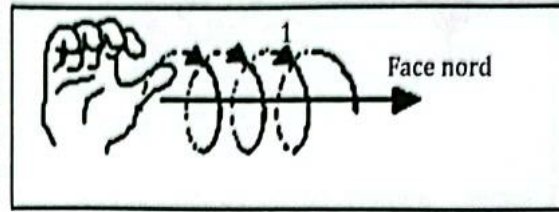


Ligne de champ et face d'un solénoïde

LEÇON 6 : MOUVEMENT D'UNE PARTICULE CHARGÉE DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE UNIFORME



Expérience : la force de Lorentz



LEÇON 7 : LOI DE LAPLACE

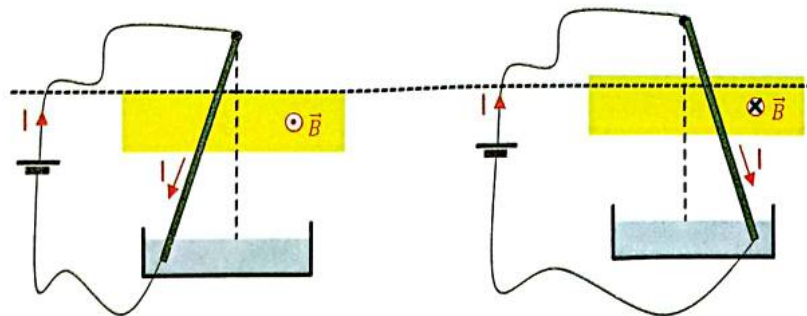
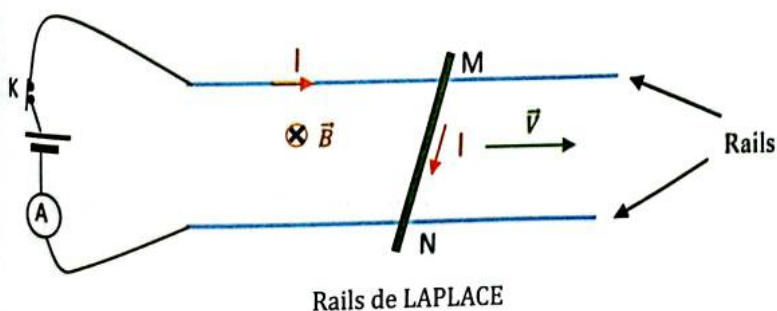
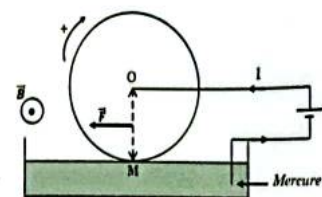


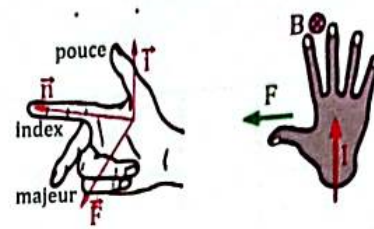
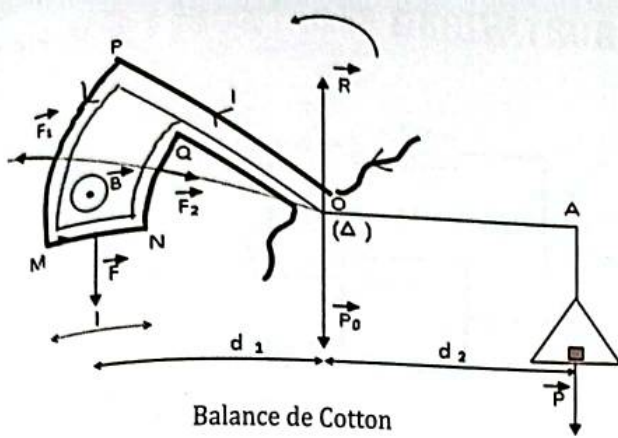
Schéma de l'expérience de la tige de LAPLACE



Rails de LAPLACE

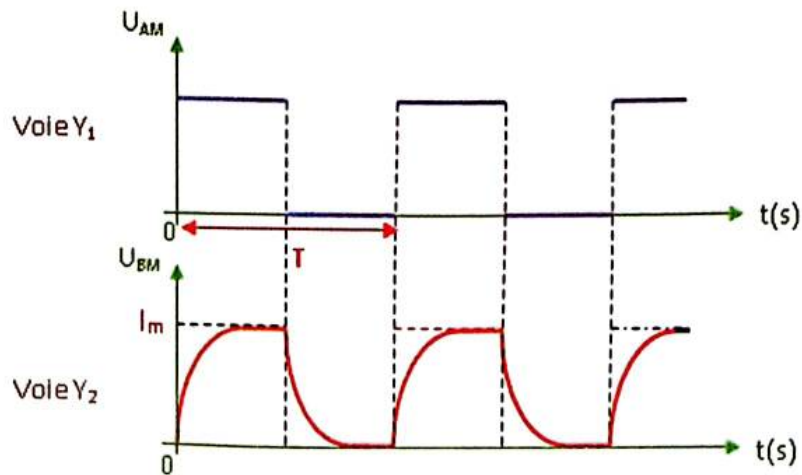
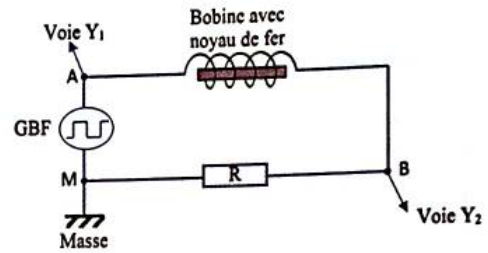
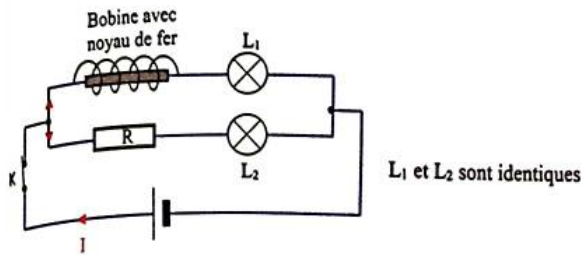


Roue de Barlow

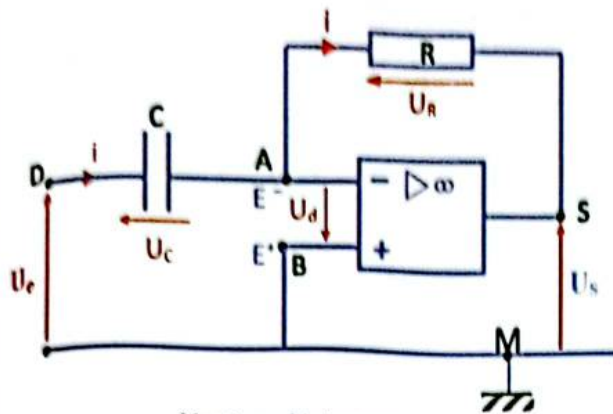


Détermination du sens de la force de Laplace

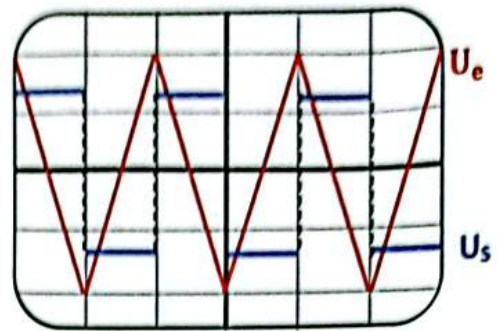
LEÇON 8 : AUTO-INDUCTION



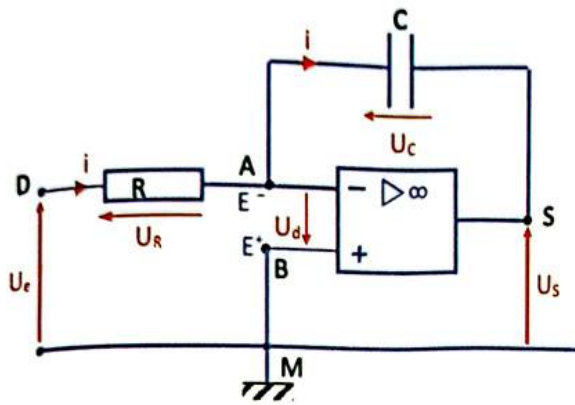
LEÇON 9 : MONTAGES DERIVATEUR ET INTÉGRATEUR



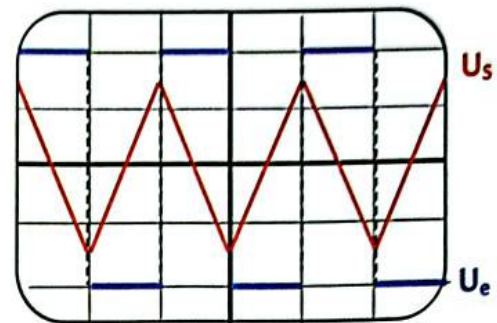
Montage dérivateur



Visualisation à l'oscilloscope

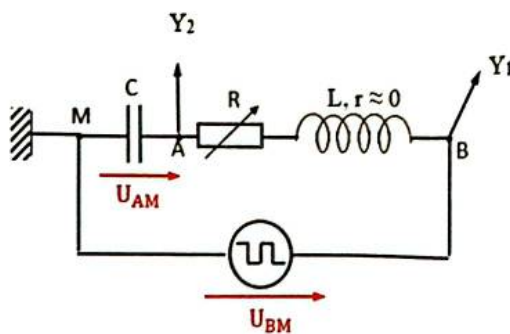


Montage intégrateur

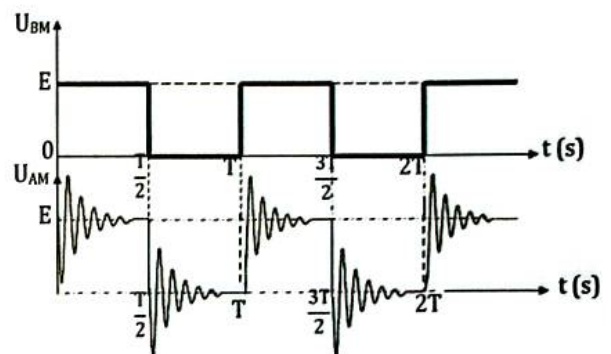


Visualisation à l'oscilloscope

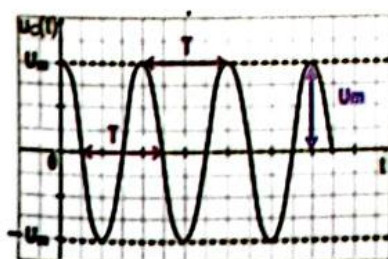
LEÇON 10 : OSCILLATION ÉLECTRIQUES LIBRES DANS UN CIRCUIT LC



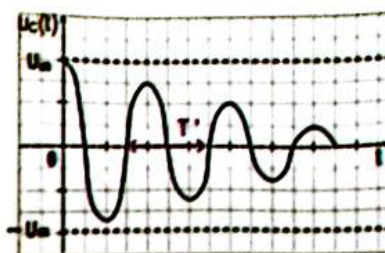
Charge et décharge d'un condensateur



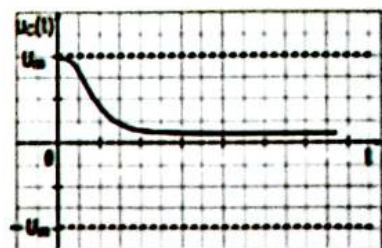
Visualisation à l'oscilloscope



(a): R_t très faible

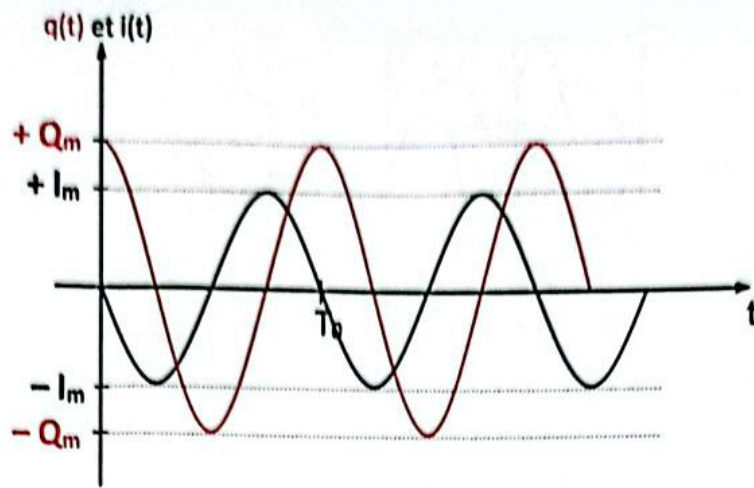


(b): R_t faible

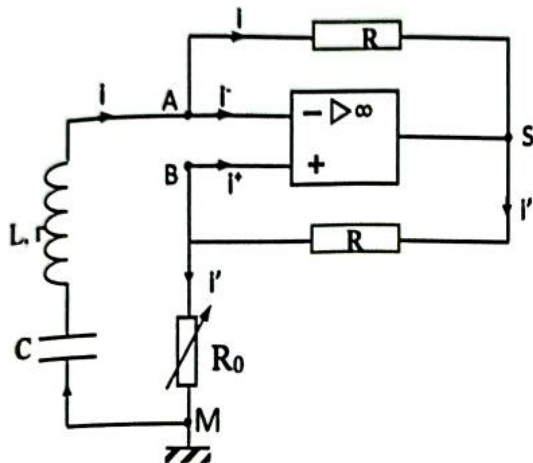


(c): R_t très grand

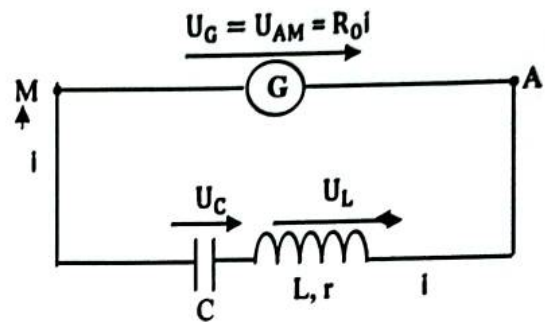
Influence de la résistance totale du circuit



Visualisation de $i(t)$ et $q(t)$

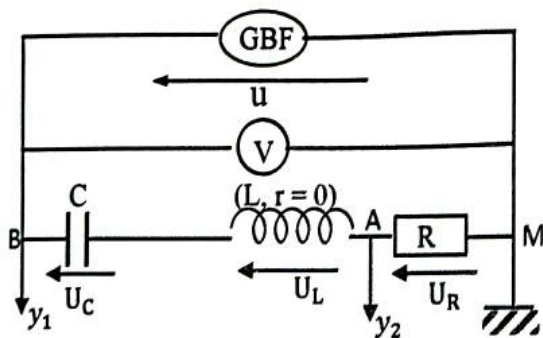


Générateur auxiliaire

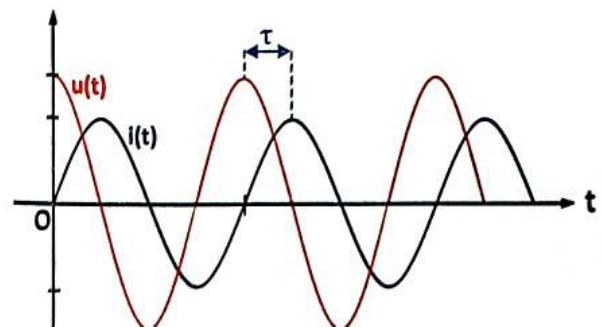


Entretien des oscillations

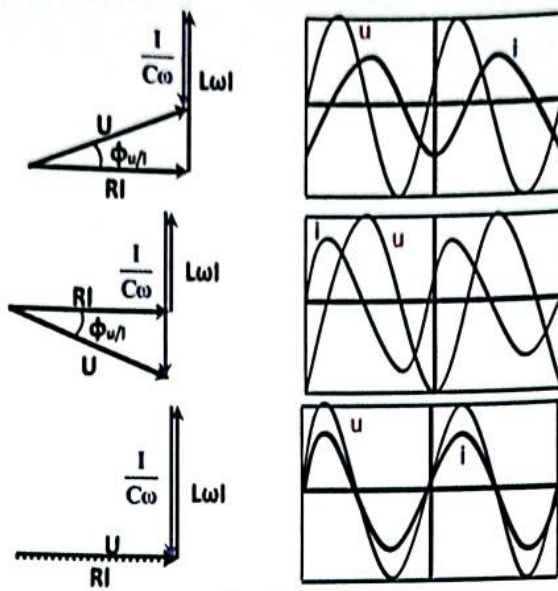
LEÇON 13 : CIRCUIT RLC EN RÉGIME SINUSOÏDAL FORCÉ



Etude expérimentale du circuit RLC série



Observation à l'oscilloscope



Étude de la phase $\phi_{u/i}$