

Physique - Chimie

Cours

Enseignement obligatoire
Terminale S

Séquences 1 à 10

Rédaction

Jean-Paul BUSNEL

Philippe BRIAND

Guy LE PARC

Coordination

Jean BOUSQUET

Direction pédagogique des disciplines scientifiques

Jean-Michel LE LAOUÉANAN

Référence : 7-SP02-TEPA00-05

Ce cours a été rédigé et publié dans le cadre de l'activité du Centre National d'Enseignement à Distance, Institut de Rennes.
Toute autre utilisation, notamment à but lucratif, est interdite.

Imprimé au Cned - Institut de RENNES 7, rue du Clos Courtel 35050 RENNES CEDEX 9

Sommaire > Général > Général

Quelques adresses Internet utiles pour illustrer le programme de Chimie..... 5

Séquence 1

> **Physique**

Ondes mécaniques progressives

> **Chimie**

Transformations lentes
et rapides d'un système chimique

7

Séquence 3

> **Physique**

Énergie nucléaire

> **Chimie**

Mise en évidence
de la notion d'équilibre chimique

77

Séquence 2

> **Physique**

Radioactivité

> **Chimie**

Suivi de l'évolution d'un système
chimique dans le temps

39

Séquence 4

> **Physique**

Évolution d'un système électri-
que contenant un condensateur

> **Chimie**

État d'équilibre d'un système
chimique

111

Sommaire > Général > Général

Séquence 5

> Physique

Évolution d'un système électrique contenant une bobine

> Chimie

Réactions acido-basiques

143

Séquence 8

> Physique

Systèmes oscillants mécaniques

> Chimie

Les réactions d'estérification et d'hydrolyse d'un ester

269

Séquence 6

> Physique

La mécanique de Newton

> Chimie

Sens d'évolution spontanée

193

Séquence 9

> Physique

Énergie mécanique

> Chimie

Contrôle de l'évolution d'un système par changement d'un réactif

311

Séquence 7

> Physique

Applications de la deuxième loi de Newton

> Chimie

Piles et électrolyses

227

Séquence 10

> Physique

La lumière et le temps

> Chimie

Contrôle de l'évolution d'un système par utilisation de la catalyse

353

Quelques adresses internet utiles pour illustrer le programme de chimie

Tout d'abord un glossaire intéressant tant en physique qu'en chimie :

<http://www.ac-bordeaux.fr/Pedagogie/Physique/Physico/glossair.htm>

Un site général en chimie et agréable à parcourir :

http://www.users.skynet.be/chr_loockx_sciences/accueil.htm

4 : État d'équilibre d'un système chimique

L'équilibre chimique :

<http://www.geocities.com/capecanaveral/9305/equi1.htm>

et la constante d'équilibre

<http://www.geocities.com/capecanaveral/9305/const.htm>

5 : Réactions acido-basiques

Quelques renseignements sur les indicateurs colorés :

<http://www.cegep-st-laurent.qc.ca/depar/chimie/indicate.htm>

simulations de courbes de titrages acide-base :

<http://www.cegep-st-laurent.qc.ca/depar/chimie/solution/cour.htm>

7 : Piles et électrolyses

sur les piles :

<http://www.cegep-st-laurent.qc.ca/depar/chimie/piles.htm> ou :

http://web.ac-reims.fr/datice/math-sciences/doc_peda/doc/piles.htm

Fabriquer une citron-pile :

http://www.users.skynet.be/chr_loockx_sciences/citron_pile.htm

8 : Les réactions d'estérification et d'hydrolyse d'un ester

Sur l'estérification :

<http://www.ping.be/%257eping6998/esterification.htm>

<http://mail.cegep-baie-comeau.qc.ca/chimie/projet8/page2.html>

sur les savons :

<http://www.fsj.ualberta.ca/chimie/chim161/bLIPIDES/sld009.htm>

9 : Contrôle de l'évolution d'un système chimique par changement d'un réactif

On peut trouver les formules chimiques de nombreux médicaments sur le site : <http://www2.biam2.org>

Aspirine (histoire et synthèse) : <http://www.ping.be/~ping6998/aspirin.htm>

<http://www.canal-u.education.fr/> rubrique « plantes et médicaments ».

10 : Contrôle de l'évolution d'un système par utilisation de la catalyse

<http://www.canal-u.education.fr/> rubrique « catalyse ».

Séquence

1

> **Physique :**

**Ondes mécaniques
progressives**

> **Chimie :**

**Transformations lentes
et rapides d'un système
chimique**

Sommaire

Séquence 1

Physique > Ondes mécaniques progressives

Chapitre 1	>	Progression d'un signal le long d'une corde	13
Chapitre 2	>	Ondes mécaniques progressives	15
		A Exemples	
		B Propriétés générales des ondes	
Chapitre 3	>	Ondes progressives périodiques	17
		A Notion d'onde progressive périodique	
		B Longueur d'onde	
		C Exemple : onde sinusoïdale le long d'une corde	
Chapitre 4	>	Dispersion	20
Chapitre 5	>	Diffraction	21
	>	Résumé	22
	>	Exercices	23

Chimie > Transformations lentes et rapides d'un système chimique

Chapitre 1 > **Les questions qui se posent au chimiste** 29

Chapitre 2 > **Le paramètre temps dans les réactions chimiques** 31

A Quelques exemples de transformations

B Analyse des résultats

Chapitre 3 > **Facteurs cinétiques** 33

A Influence de la concentration des réactifs

B Influence de la température du système

> **Résumé** 36

> **Exercices** 37

Physique

Objectifs

- ▶ Savoir définir et calculer la célérité de propagation d'un signal.
- ▶ Connaître les propriétés générales des ondes progressives.
- ▶ Savoir définir et calculer la période, la fréquence et la longueur d'onde d'une onde périodique.
- ▶ Connaître les phénomènes de dispersion et de diffraction.

Propagation d'un signal le long d'une corde

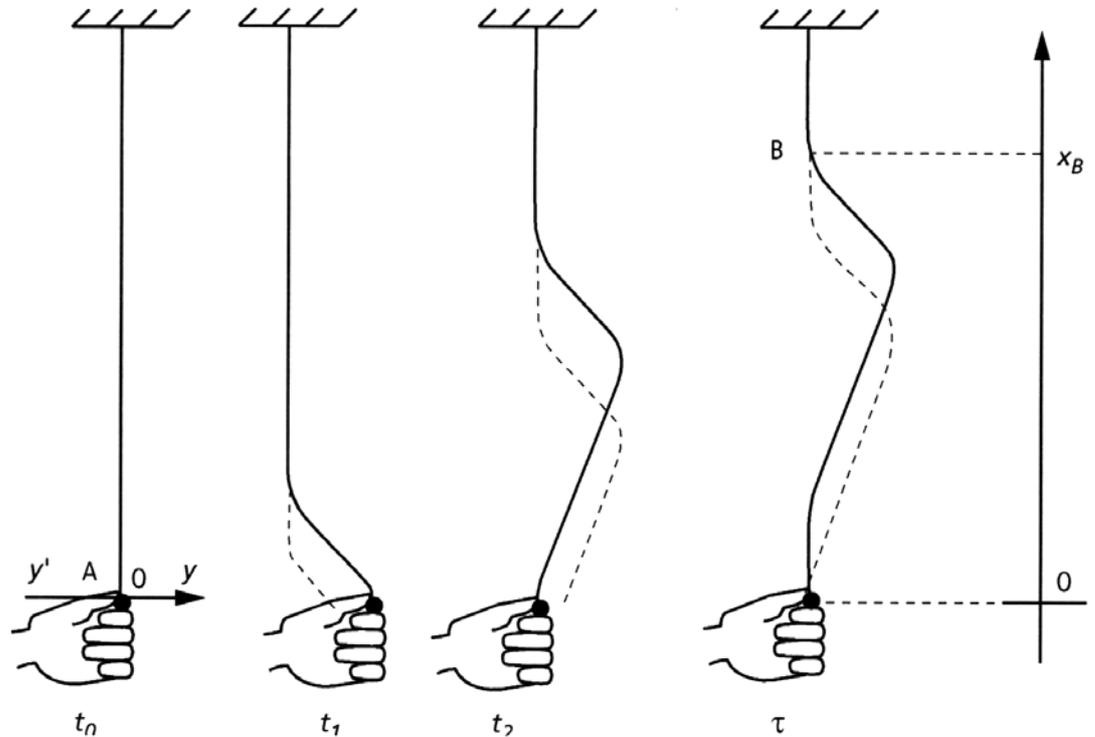


Figure 1

Le schéma de la figure 1 représente une corde de grande longueur suspendue verticalement et dont l'extrémité A est tenue par un expérimentateur.

On utilise, par la suite, un axe Ox dirigé selon la corde et un axe $y'y$ horizontal.

À la date $t_0 = 0$, la main commence à mettre en mouvement vers la droite l'extrémité A de la corde initialement située en O, l'ordonnée de l'extrémité A de la corde devient alors positive selon l'axe $y'y$ horizontal dirigé vers la droite et dont l'origine est confondue avec le point O.

À la date t_1 , le mouvement de la main vers la droite s'arrête et le retour vers la position initiale s'amorce. À la date t_2 , la position initiale est retrouvée et l'extrémité A est maintenue immobile.

Les allures de la courbe pour des dates intermédiaires sont indiquées en pointillés sur le schéma.

La forme de l'ébranlement qui se propage le long de la corde révèle que le mouvement initial de la main (de la gauche vers la droite) a été effectué plus rapidement que le mouvement de retour à la position initiale (de la droite vers la gauche) puisque la « photographie » de la corde montre un front montant rapide suivi d'une pente plus douce.

Ce mouvement, imposé à l'extrémité A a créé un ébranlement (ou signal) qui se propage ensuite le long de la corde : Ainsi, à la date τ , il atteint le point B repéré par son abscisse x_B sur un axe Ox vertical ascendant.

L'ébranlement s'est donc propagé avec une célérité $V = \frac{x_B}{\tau}$ puisqu'il a parcouru la distance x_B pendant une durée égale à τ .

On constate expérimentalement que la célérité de propagation d'un signal le long d'une corde ne dépend pas de la forme de ce signal.

La courbe 1 de la figure 2 ci-dessous reproduit les variations de l'ordonnée y_A de l'extrémité A de la corde en fonction du temps, l'allure de cette courbe traduit, conformément aux « photographies »

précédentes un mouvement de retour vers la position initiale plus lent que le mouvement « aller » puisque, $t_2 - t_1 > t_1 - t_0$.

Les mouvements imposés à l'extrémité A se retrouvent au point B sans modifications (en négligeant l'amortissement de l'ébranlement) et la courbe 2 représentant les variations de y_B en fonction du temps se déduit de la courbe 1 en la décalant d'une durée égale à τ .

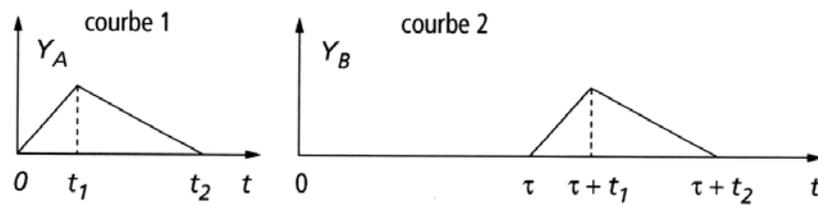


Figure 2

La valeur de y_B à une date t est ainsi égale à la valeur de y_A à la date $(t - \tau)$, puisque τ représente la durée mise par un signal pour aller de A jusqu'en B.

Activité 1

La courbe de la figure 3 représente l'ordonnée y_A de l'extrémité A de la corde avec un dispositif identique à celui utilisé précédemment. Les signaux se propagent le long de la corde avec une célérité égale à $50 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Tracer la courbe représentant les variations y_B de l'ordonnée d'un point B de la corde, B étant situé à 10 cm de A.

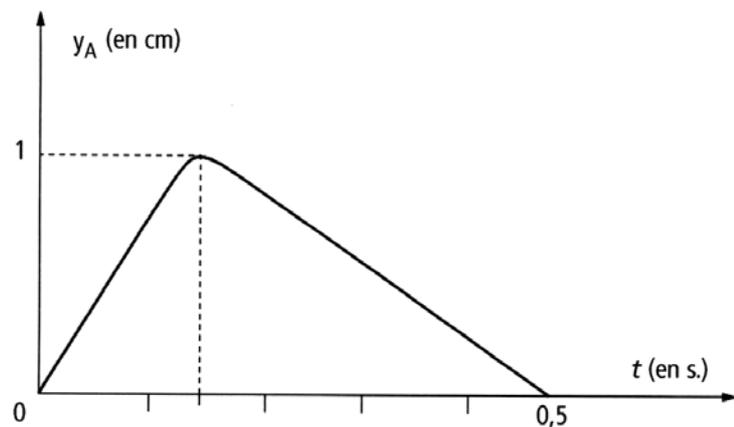


Figure 3

Activité 2

Toujours avec le même dispositif, on impose au point A un déplacement tel que son ordonnée y_A varie en fonction du temps comme indiqué dans le tableau ci-dessous.

Compléter ce tableau en y faisant figurer, aux différentes dates, les ordonnées y_M et y_N des points M et N situés respectivement à 15 cm et à 20 cm. de A.

Célérité de propagation des signaux : $V = 50 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

t (en s)	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
y_A (en mm)	0	2	4	6	3	0	0	0	0	0	0
y_M (en mm)											
y_N (en mm)											

A Exemples

Dans l'exemple précédent de l'ébranlement se propageant le long de la corde, on avait parlé de la propagation d'un « signal » dans la mesure où la déformation qui se propageait avait une forme très simple : une simple « bosse ». Dans le cas général, où la perturbation qui se transmet à une forme plus complexe, on parlera de la propagation d'une onde : un cas particulièrement intéressant étant celui d'une onde périodique (une succession d'ondulations qui se propagent).

L'adjectif « progressive » traduit simplement le fait que l'onde avance (progressive) dans le milieu.

On qualifie l'onde de « transversale » lorsque la perturbation se fait dans une direction perpendiculaire au milieu de propagation, c'est le cas pour une onde se propageant le long d'une corde ; ainsi, en agitant sans arrêt l'extrémité A de la corde représentée sur la figure 1, on crée des ondulations qui se propagent selon l'axe vertical en entraînant, pour chaque point de la corde, des déplacements horizontaux (selon l'axe $y'y$).

Un autre exemple d'ondes transversales est celui des ondes se propageant à la surface de l'eau : lorsque la « vague » arrive, l'eau se déplace verticalement alors que l'onde se déplace sur la surface horizontale de l'eau.

Il existe aussi des ondes longitudinales : lorsque l'onde arrive, les points du milieu de propagation se déplacent dans la même direction que la direction de propagation de l'onde avant de reprendre leurs positions d'origine : ainsi, lorsqu'on pince quelques spires d'un ressort avant de les relâcher, la perturbation ainsi créée va se déplacer le long du ressort et toutes les spires vont successivement se déplacer dans la direction du ressort (figure 3).

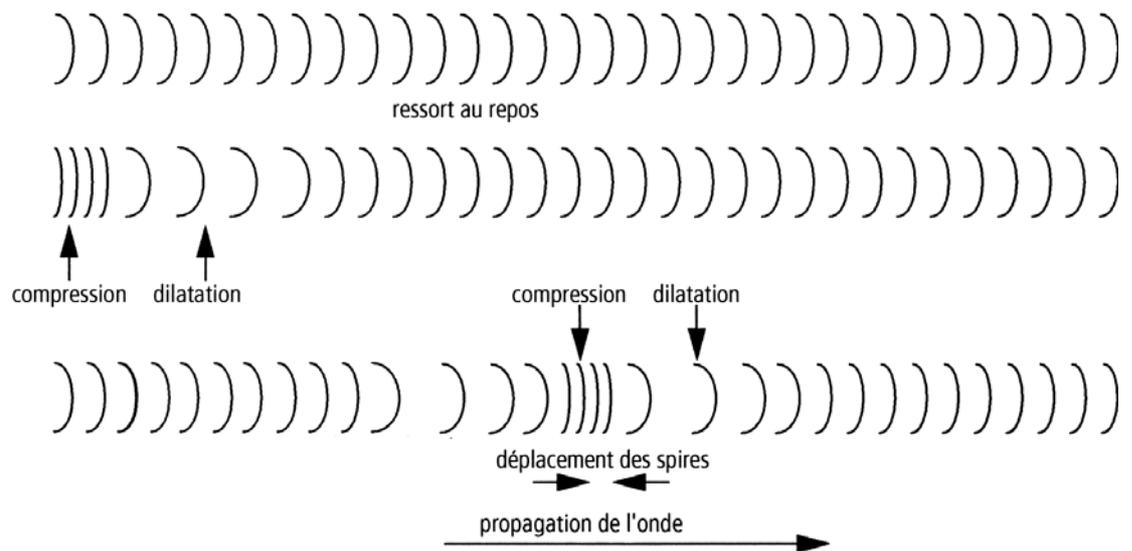


Figure 3

Les ondes sonores sont aussi des ondes longitudinales : à l'arrivée du son, l'air se met à vibrer dans la direction de propagation du son : tantôt, il est comprimé, tantôt il est dilaté. Pour vous représenter la propagation du son, il suffit de remplacer sur le schéma de la figure 3 les spires du ressort par des « tranches d'air ».

Activité 3 *Les ondes mécaniques se propagent dans des milieux élastiques, c'est-à-dire des milieux qui reprennent leur configuration initiale après avoir subi une déformation.*

Il est clair qu'une corde tendue ou un ressort sont bien des milieux élastiques.

Pour vous convaincre que la surface de l'eau possède bien des propriétés élastiques, essayez d'étaler au maximum une tâche d'eau sur un support non absorbant (bord d'un évier, table en formica, toile cirée...) Que constatez-vous ?

Quelle expérience proposez-vous pour montrer les propriétés élastiques de l'air ?

Activité 4 *Vous avez déjà observé des rides circulaires se déplaçant à la surface de l'eau. Pourquoi dit-on, dans un tel cas, que l'onde se propage mais qu'il n'y a pas, lors de cette propagation, transfert de matière ?*

B Propriétés générales des ondes

Quel que soit le type d'onde mécanique étudié, l'observation permet de constater quelques caractéristiques générales ;

– L'onde se propage dans toutes les directions qui lui sont offertes.

Sur une corde, milieu à une dimension, elle ne peut se propager que dans une seule direction, mais à la surface de l'eau, milieu à deux dimensions, elle se propage à partir du point d'émission dans toutes les directions du plan et le son se propage dans l'air, milieu à trois dimensions, dans toutes les directions de l'espace.

– La perturbation se transmet de proche en proche (du fait de l'élasticité du milieu de propagation).

Après passage de l'onde, tous les points du milieu retrouvent leurs positions d'origine ; il n'y a donc pas globalement un transfert de matière mais il y a un transfert d'énergie provoqué par l'onde.

– La vitesse de propagation de l'onde est une propriété du milieu. Elle dépend en effet des qualités d'élasticité du milieu et de son inertie (c'est-à-dire de la difficulté plus ou moins grande à le mettre en mouvement : plus l'inertie du milieu est grande, moins la vitesse est élevée).

– Deux ondes peuvent se croiser sans se perturber : pour s'en convaincre, il suffit de créer deux ondes circulaires en deux points distincts à la surface d'un étang pour les voir se propager, se chevaucher là où elles se rencontrent puis poursuivre leur propagation indépendamment l'une de l'autre.

Activité 5 *L'onde est responsable d'un transfert d'énergie. Sous quelle forme, l'énergie est-elle transférée lorsqu'une onde se propage à la surface de l'eau ?*

A Notions d'onde progressive périodique

Une onde progressive est dite périodique si le signal reçu en chaque point du milieu de propagation est une fonction périodique du temps, c'est-à-dire si le signal reçu se répète identique à lui-même à intervalles de temps identiques appelés période T .

Cela nécessite que l'excitateur, c'est-à-dire la source à l'origine de l'émission, impose un signal périodique. Par exemple, dans le cas d'ondes se propageant à la surface de l'eau, il faut répéter à l'identique, le mouvement qui, à la surface de l'eau impose les vibrations.

Le cas le plus simple d'onde périodique est celui d'ondes périodiques sinusoïdales : le signal émis à la source et donc le signal reçu en chaque point sont alors des fonctions sinusoïdales du temps.

Ceci peut être obtenu avec un vibreur relié à la corde pour obtenir une onde sinusoïdale le long de la corde, ou avec un vibreur relié à une pointe frappant le liquide pour obtenir une onde circulaire sinusoïdale à la surface de l'eau, ou bien avec un haut-parleur dont la membrane vibre sinusoïdalement pour obtenir des ondes sonores sinusoïdales.

B Longueur d'onde

Considérons une onde sinusoïdale de période T .

On appelle :

► fréquence ν (prononcer « nu ») le nombre de périodes contenues en une seconde : $\nu = \frac{1}{T}$.

T étant exprimée en seconde, ν s'exprime en Hertz (Hz).

► longueur d'onde λ (prononcer « lambda ») la distance parcourue par l'onde en une période : $\lambda = VT$ en notant « V » la vitesse (ou célérité) de propagation des ondes dans le milieu.

C Exemple : onde sinusoïdale le long d'une corde

Aspect de la corde



Figure 4

L'extrémité A d'une corde tendue horizontalement est reliée à un vibreur qui lui impose un mouvement vertical sinusoïdal de période T . Les signaux se propagent ensuite le long de la corde avec une

vitesse constante V et nous avons représenté ci-dessous l'aspect de la corde à différentes dates après le début du mouvement de A. Nous avons restreint notre étude au cas où l'onde n'a pas atteint l'extrémité E de la corde pour ne pas avoir à envisager la réflexion de l'onde en ce point.

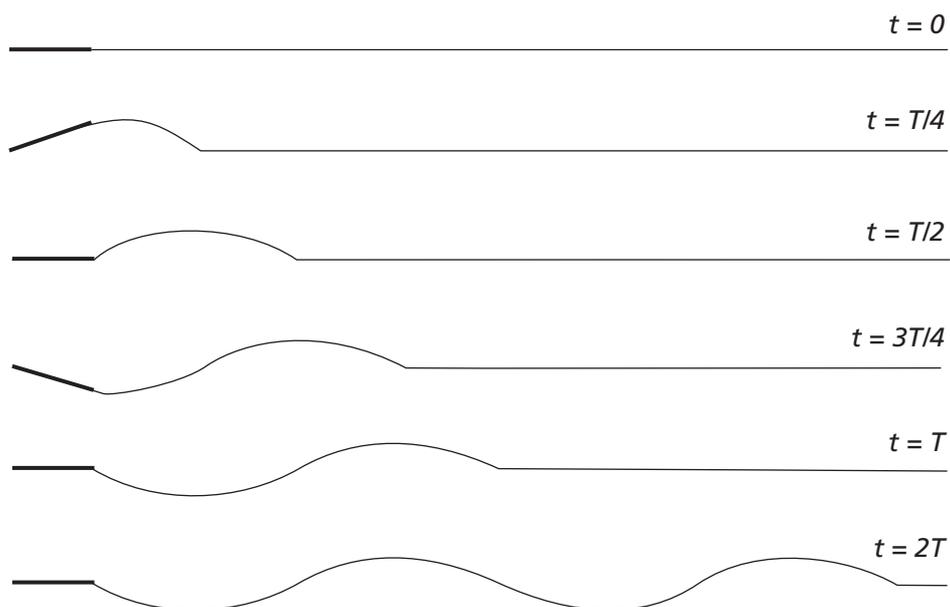


Figure 5

On constate que la corde, soumise aux vibrations de période T de son extrémité, présente rapidement un aspect ondulé que l'on peut considérer comme la répétition d'un même motif se répétant à l'identique. La longueur de ce motif répété périodiquement est la longueur d'onde que l'on appelle aussi « période spatiale ». Il y a donc double périodicité : la période temporelle T qui caractérise le mouvement de chaque point de la corde et la période spatiale λ qui caractérise l'aspect de cette corde, à une date donnée.

Activité 6 Dessiner l'aspect de la corde aux dates $t = \frac{5T}{4}$ et $t = \frac{3T}{2}$.

Activité 7 Calculer la longueur d'onde dans l'exemple précédent sachant que la fréquence du vibreur était fixée à 20 Hz et que la célérité de propagation sur la corde très fine valait $2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Sans changer la fréquence de vibration, on double la tension de la corde. Indiquer comment on procède et calculer la nouvelle longueur d'onde sachant que la célérité est proportionnelle à la racine carrée de la tension de la corde.

Vibrations observées en différents points

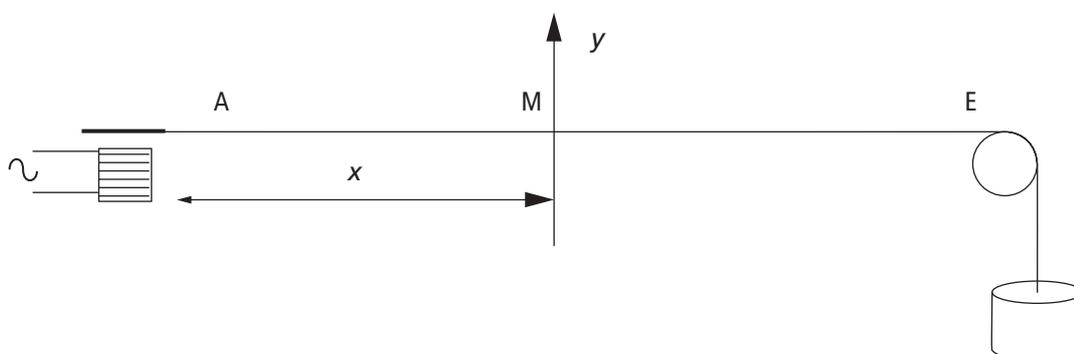


Figure 6

Considérons un point M de la corde situé à une distance $AM = x$ de l'extrémité A.

En négligeant tout phénomène d'amortissement le long de la corde, nous pouvons dire que l'état de vibration en M à une date t correspond à l'état de vibration du point A à la date $(t - \tau)$, en notant τ la durée nécessaire pour que l'onde se propage de A à M.

En repérant l'état de vibration de chaque point par son ordonnée y selon un axe vertical ascendant ayant pour origine la position de repos, nous obtiendrons pour les variations de y_A et y_M des courbes semblables à celles que nous avons représentées sur la figure 7, le retard τ dépendant bien entendu de la position du point M puisque $\tau = \frac{x}{v}$.

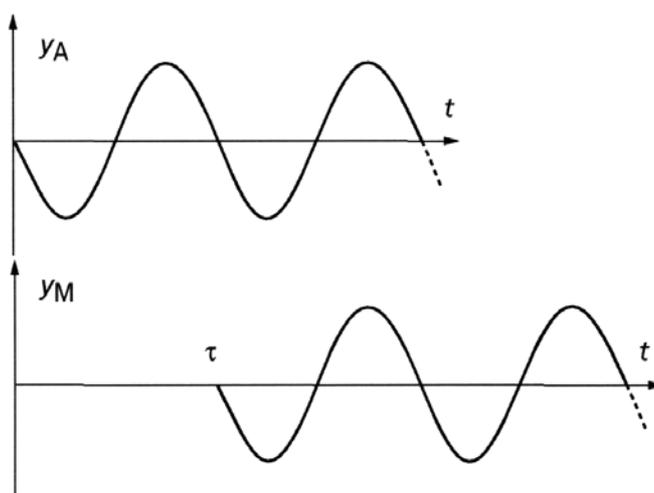


Figure 7

Certains points auront, à chaque instant dès lors que l'onde est parvenue jusqu'à eux, le même état de vibration, c'est-à-dire en particulier qu'ils atteindront leur altitude maximale en même temps, on dit alors que ces points vibrent en phase.

En revanche, si deux points ont des états de vibration opposés, c'est-à-dire en particulier que l'un atteint son altitude maximale quand l'autre atteint son altitude minimale, on dit que ces deux points vibrent en opposition de phase.

Activité 8 *Le point A et le point M dont on a représenté le mouvement en fonction du temps sur la figure 7 vibrent-ils en phase ? En opposition de phase ?*

Activité 9 *Déterminer, en fonction de la longueur d'onde, la distance entre deux points consécutifs situés sur la corde, qui vibrent en phase et la distance entre deux points consécutifs qui vibrent en opposition de phase.*

Quelle est, en fonction de la longueur d'onde, la distance entre deux crêtes consécutives lorsqu'une onde se propage à la surface de l'eau ?

Activité 10 *Lorsqu'une onde se propage le long d'une corde, l'état de vibration, en un point et à un instant donné, est la valeur de l'ordonnée selon un axe perpendiculaire à la corde. De même lorsqu'une onde se propage à la surface de l'eau, l'état de vibration est l'ordonnée selon un axe vertical. Mais qu'appelle-t-on état de vibration en un point à un instant donné lorsqu'une onde longitudinale se propage le long d'un ressort ? Représenter l'aspect d'un ressort parcouru par une onde sinusoïdale.*

Lorsque la vitesse de propagation d'une onde est la même quelle que soit sa fréquence, le milieu de propagation est dit « non dispersif ». C'est le cas, en particulier des ondes se propageant le long d'une corde.

En revanche, le milieu est dit « dispersif », si la vitesse de propagation de l'onde dépend de la fréquence. C'est le cas, en particulier, des ondes se propageant à la surface de l'eau (voir exercice XX).

Activité 11 *On admet que les fréquences des sons audibles par l'oreille humaine sont approximativement comprises entre 20 Hz et 20 kHz. Comment reconnaît-on à l'audition un son de basse fréquence d'un son de haute fréquence ? L'air est-il un milieu dispersif ou non dispersif pour la propagation des ondes sonores ?*

Le schéma 1 de la figure 8 représente une onde plane à la surface de l'eau arrivant sur un obstacle fixe dont les dimensions sont de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde.

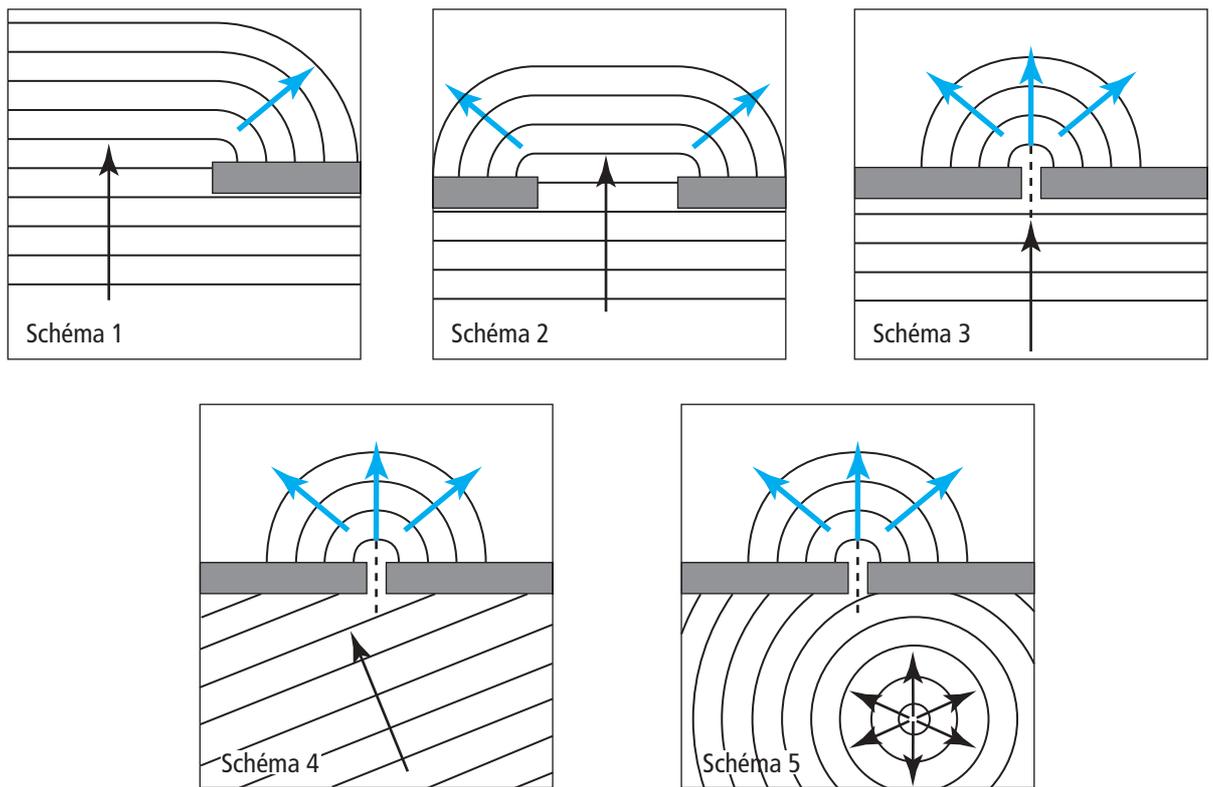
L'onde plane est constituée d'une série de vagues rectilignes qui sont obtenues en agitant une règle rectiligne à la surface de l'eau. Les traits figurant sur le schéma représentent les crêtes de ces vagues à un instant donné, la distance entre deux traits est donc égale à une longueur d'onde.

Le schéma 1 illustre le phénomène de diffraction : l'onde incidente (celle qui arrive sur l'obstacle) s'incurve autour de l'obstacle, si bien qu'une partie de l'onde incidente, appelée onde diffractée, atteint les points situés derrière l'obstacle.

Sur le schéma 2, on a placé deux obstacles, si bien que le phénomène de diffraction s'observe des deux côtés.

Sur les schémas 3 et 4, on a laissé un faible espace entre les deux obstacles. Dès lors que la largeur de l'ouverture est comparable (ou inférieure) à la longueur d'onde, l'onde diffractée (celle qui a passé l'obstacle) est pratiquement circulaire : les vagues ont l'allure de cercles centrés sur l'ouverture (mais leur amplitude est plus grande dans la direction indiquée en pointillés sur les schémas et correspondant à la médiatrice de l'ouverture).

Sur le schéma 5, on a représenté ce même phénomène de diffraction observé avec une onde incidente circulaire : les vagues incidentes ont alors la forme de cercles concentriques centrés sur le point S où une aiguille verticale vibre à la surface de l'eau.



les flèches noires indiquent le sens de propagation de l'onde incidente,
les flèches bleues le sens de propagation de l'onde diffractée

Figure 8

Activité 12

Les schémas de la figure 8 reproduisent des photographies de la surface de l'eau, les traits noirs (figurant les crêtes des vagues observées). Que peut-on en conclure sur la longueur d'onde de l'onde diffractée par rapport à la longueur d'onde de l'onde incidente ?

Résumé

► Si deux points A et B, séparés par une distance D, sont situés dans un même milieu de propagation, une onde créée en A parviendra en B avec un retard $\tau = \frac{D}{V}$, en notant V la célérité de l'onde.

► On qualifie l'onde de « transversale » lorsque la perturbation se fait dans une direction perpendiculaire au milieu de propagation (onde se propageant le long d'une corde, ondes à la surface de l'eau...).

On qualifie l'onde de longitudinale quand la perturbation se fait selon la direction de propagation (onde le long d'un ressort dont on a pincé quelques spires, ondes sonores...)

► Après passage de l'onde, tous les points du milieu retrouvent leurs positions d'origine : il n'y a donc pas globalement un transfert de matière mais il y a un transfert d'énergie provoqué par l'onde.

► La vitesse de propagation de l'onde est une propriété du milieu. Elle dépend en effet des qualités d'élasticité du milieu et de son inertie (c'est-à-dire de la difficulté plus ou moins grande à le mettre en mouvement : plus l'inertie du milieu est grande, moins la vitesse est élevée).

► La fréquence ν représente le nombre de périodes contenues en une seconde : $\nu = \frac{1}{T}$, elle s'exprime en Hertz (Hz).

► On appelle longueur d'onde λ la distance parcourue par l'onde en une période : $\lambda = VT$.

► Lors de la propagation d'une onde périodique, il y a, en fait, double périodicité : la période temporelle T qui caractérise le mouvement de chaque point de la corde et la période spatiale λ qui caractérise l'aspect du milieu à une date donnée.

► On dit que deux points du milieu de propagation vibrent en phase si, à partir du moment où ils sont atteints par l'onde, leur état de vibration est identique.

On dit que deux points du milieu de propagation vibrent en opposition de phase si, à partir du moment où ils sont atteints par l'onde, leur état de vibration est opposé.

► Lorsque la vitesse de propagation d'une onde est la même quelle que soit sa fréquence, le milieu de propagation est dit « non dispersif »

► Le phénomène de diffraction est observé lorsque l'onde incidente rencontre un obstacle de dimension comparable ou inférieure à sa longueur d'onde : on constate alors que l'onde contourne l'obstacle, si bien qu'une partie de l'onde incidente, appelée onde diffractée, atteint les points situés derrière l'obstacle.

Exercices

➡ **Savoir définir et calculer la célérité de propagation d'un signal**

Exercice 1 Propagation le long d'une corde tendue

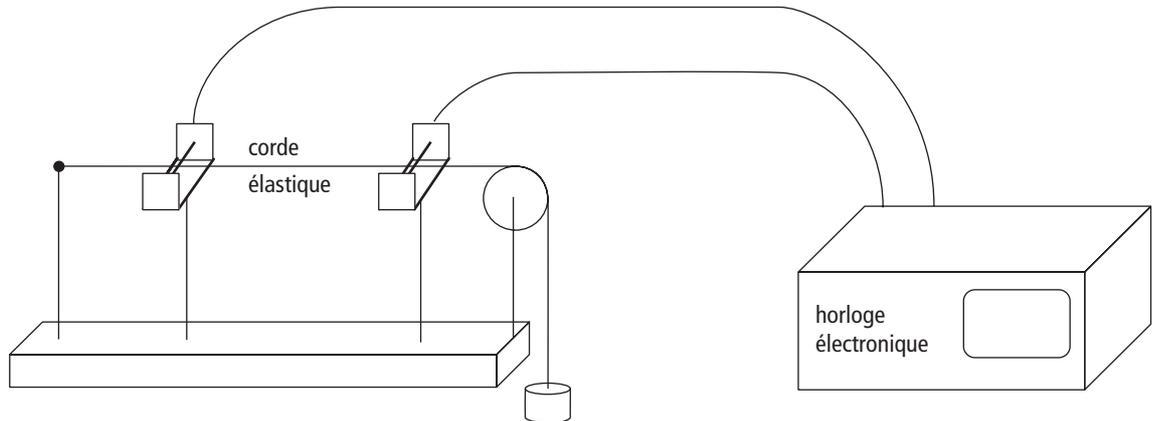


Figure 1

La figure 1 ci-dessus représente un dispositif utilisé pour mesurer la célérité de propagation d'un signal le long d'une corde élastique, en utilisant deux cellules photoélectriques séparées par une distance de 1,00 m.

- 1 Expliquez le principe de cette mesure.
- 2 Lorsque la masse suspendue à l'extrémité de la corde vaut $M = 1,00 \text{ kg}$, l'horloge électronique indique une valeur de 125 millisecondes. En déduire la célérité de propagation du signal le long de la corde.
- 3 Lorsque la masse suspendue à l'extrémité de la corde vaut $M' = 2,00 \text{ kg}$, l'horloge électronique indique une valeur de 88 millisecondes. En déduire la nouvelle valeur de la célérité de propagation du signal le long de la corde. Ces résultats montrent que la célérité de propagation dépend de la tension de la corde (égale au poids de la masse suspendue), sont-ils en accord avec l'hypothèse d'une relation de proportionnalité entre la valeur de la célérité et celle de la tension de la corde ?

Exercice 2 Échelle de perroquet

Le dispositif de la figure 2, appelé échelle de perroquet, est constitué d'un mince ruban métallique tendu verticalement et auquel sont soudées des barres métalliques équidistantes terminées par de petites boules colorées (schéma a).

Si l'on écarte une de ces barres de la position d'équilibre, la perturbation se transmet de proche en proche et l'on observe, comme sur le schéma b, le signal qui se propage.

Sachant que les schémas b et c correspondent à la reproduction de l'aspect de l'échelle de perroquet au cours de la même expérience respectivement aux dates t_1 et t_2 avec $(t_2 - t_1) = 0,50 \text{ s}$ et sachant que la distance entre deux barres horizontales consécutives vaut 5,0 cm, déterminer la vitesse de propagation du signal.

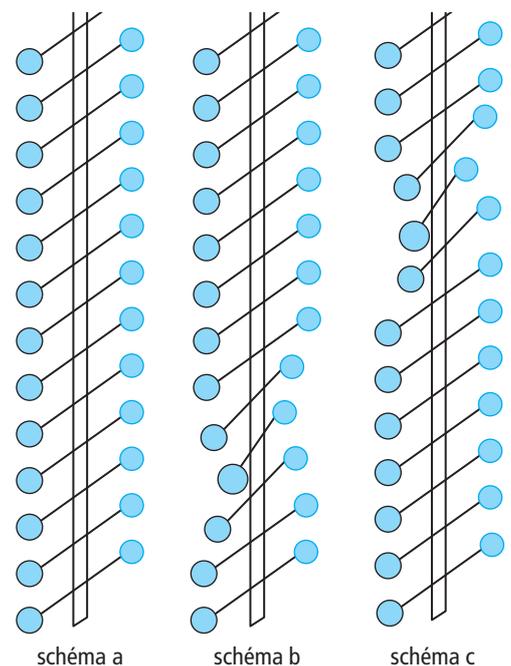


Figure 2

Connaître les propriétés générales des ondes progressives

Exercice 3 Vrai ou faux

Indiquer pour chacune des trois propositions ci-dessous si elle est exacte ou non.

- 1 Sachant que les ondes mécaniques ne se transmettent que dans les milieux élastiques, on peut en conclure que le son ne peut se transmettre dans les métaux.
- 2 Le passage d'une onde mécanique dans un milieu se traduit par un transfert de matière dans ce milieu.
- 3 Les déformations se propageraient moins vite le long de l'échelle de perroquet décrite dans l'exercice 2 si l'on remplaçait les boules situées à l'extrémité des barres horizontales par d'autres qui seraient plus lourdes.

Savoir définir et calculer la période, la fréquence et la longueur d'onde d'une onde périodique

Exercice 4 Ondes sonores

Un générateur basse fréquence (GBF) fournit une tension alternative sinusoïdale de fréquence 2 000 Hz qui alimente un haut-parleur.

- 1 Le son émis serait-il plus grave ou plus aigu si l'on choisissait pour la fréquence de la tension émise par le GBF une valeur double ?
- 2 Cette tension est visualisée sur la voie A d'un oscilloscope. L'allure de la courbe obtenue est indiquée en noir sur la figure 3. Quelle valeur de la base de temps (en millisecondes par division) a-t-on choisi lors du réglage de l'oscilloscope ?
- 3 Un microphone, placé à quelques dizaines de centimètres du haut-parleur, transforme le son reçu en tension électrique qui est visualisée sur la voie B de l'oscilloscope. On positionne le microphone de façon à observer sur l'écran de l'oscilloscope deux tensions en phase, l'observation faite sur l'oscilloscope correspondant alors exactement au schéma de la figure 3 (la courbe observée sur la voie B étant dessinée en rouge).

Partant de cette position initiale, on éloigne le microphone ce qui entraîne un décalage entre les deux courbes observées. Toutefois, si on éloigne le microphone par rapport à sa position initiale d'une distance de 17,0 cm (selon la droite $x'x$ joignant la position du haut-parleur à la position initiale du microphone), on observe à nouveau deux courbes en phase sur l'écran de l'oscilloscope. Ce phénomène n'est observable pour aucune distance inférieure à 17,0 cm entre la nouvelle position du microphone et sa position initiale. En déduire la vitesse du son dans l'air.

- 4 Dessiner les courbes qu'on aurait observées sur l'écran de l'oscilloscope si on avait éloigné le microphone, par rapport à sa position initiale et selon la droite $x'x$, de 8,5 cm.

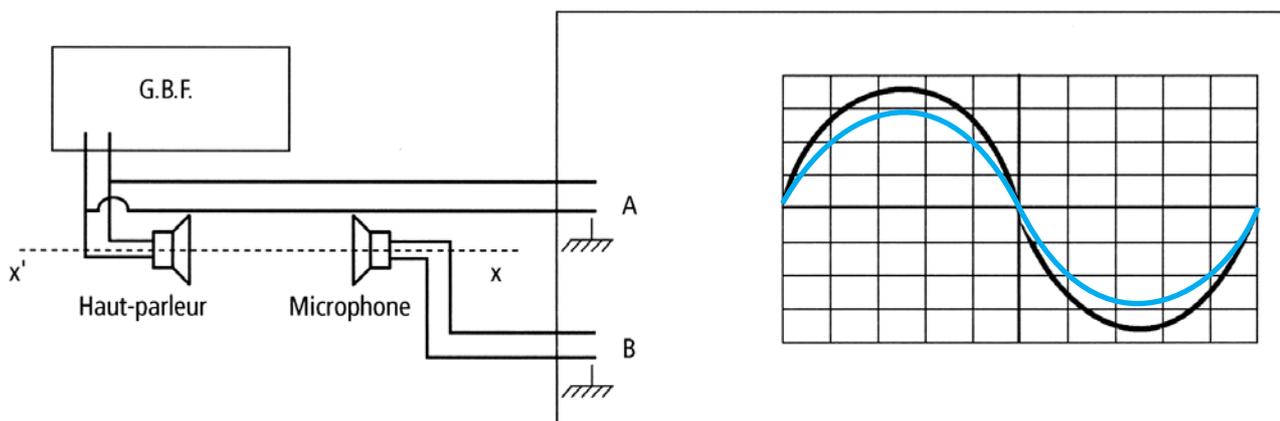


Figure 3

Exercice 5 Onde sinusoïdale sur une corde

Un vibreur de fréquence 50 Hz est relié en A à une corde tendue horizontalement.

Les ondes se propagent le long de la corde avec une célérité $V = 3,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

On étudie le mouvement de différents points de la corde que l'on repère par leur abscisse (distance au point A exprimée en cm) :

$M_1(6)$, $M_2(8)$, $M_3(9)$, $M_4(12)$, $M_5(18)$, $M_6(20)$, $M_7(21)$, $M_8(23)$, $M_9(24)$.

Indiquer, pour chacune des propositions suivantes, si elle est exacte ou non :

- a) Parmi ces différents points, il y en a quatre qui vibrent en phase avec le point A.
- b) Parmi ces différents points, il y en a trois qui vibrent en opposition de phase avec le point A.
- c) Le point M_6 vibre en phase avec le point M_2 .
- d) Le point M_8 vibre en opposition de phase avec le point M_6 .

Exercice 6 Fréquence et onde sonore

Le schéma de la figure 4 représente le signal observé sur l'écran d'un oscilloscope auquel on a relié un microphone, lors du passage d'une onde sonore. Sachant qu'à la température où on a réalisé l'expérience, la vitesse du son vaut $337 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et sachant que la base de temps de l'oscilloscope est fixée à 1 ms/division , calculer la longueur d'onde du son étudié.

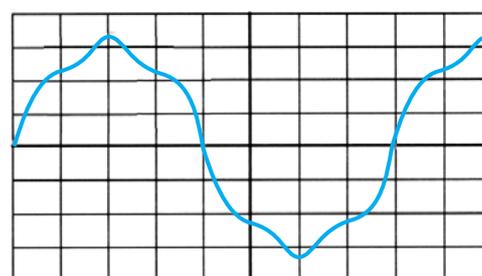


figure 4

➡ **Connaître les phénomènes de dispersion et de diffraction**

Exercice 7 Cuve à ondes

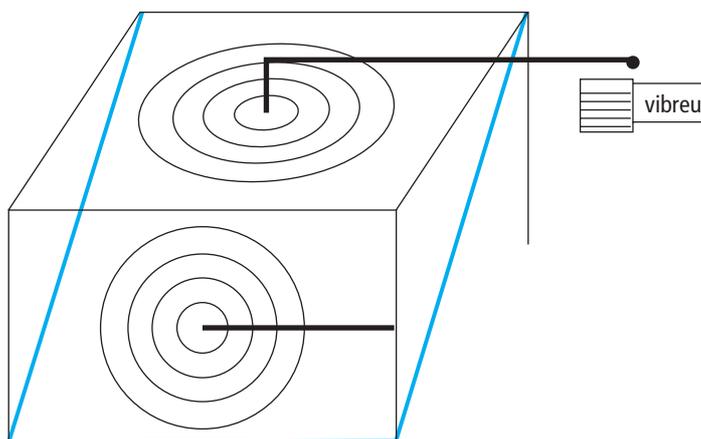


Figure 5

La figure 5 représente un dispositif en verre appelé « cuve à ondes ». Un bassin horizontal contient de l'eau et une pointe reliée à un vibreur vient frapper périodiquement la surface de l'eau engendrant des ondes circulaires. Un miroir incliné (représenté en bleu sur la figure 5) permet d'observer ces ondes circulaires sur la face avant du dispositif (l'ensemble étant éclairé par-dessus).

En effet, les vibrations se propageant dans toutes les directions à la surface du liquide donnent naissance à des ondes circulaires, la longueur d'onde étant la distance entre deux crêtes consécutives.

❶ Sachant que le vibreur produit des oscillations verticales sinusoïdales de fréquence 20 Hz et que les ondes se propagent sur l'eau avec la célérité $V = 0,50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, calculer la longueur d'onde et indi-

quer quels sont les points de la surface de l'eau qui vibrent en phase avec l'extrémité de la pointe (on se limitera aux points situés à moins de 12 cm de la pointe).

- 2 Comment peut-on expliquer qu'on observe un amortissement assez net de l'onde au fur et à mesure que l'onde s'éloigne de l'extrémité de la pointe ?
- 3 Lorsque la fréquence du vibreur est fixée à 50 Hz, la distance entre deux crêtes consécutives vaut 8,0 mm. L'eau est-elle un milieu dispersif pour ces ondes ?
- 4 Comment pourrait-on procéder pour mettre en évidence avec une cuve à ondes le phénomène de diffraction ?
- 5 Lorsqu'on éclaire la cuve à ondes avec un éclairage stroboscopique, c'est-à-dire par une succession d'éclairs périodiques, on constate que pour certaines fréquences de ces éclairs, les rides paraissent immobiles à la surface de l'eau. Ainsi, quand la fréquence du vibreur est de 20 Hz, il suffit de fixer l'intervalle de temps entre deux éclairs consécutifs à cinq centièmes de seconde pour que la surface ridée de l'eau semble immobile. Expliquez ce phénomène.

Exercice 8 Sons et ultrasons

Données : Les gaz ne sont pas des milieux dispersifs pour les ondes sonores, mais la vitesse de propagation des ondes sonores dans les gaz est proportionnelle à la racine carrée de la température exprimée en Kelvin. On rappelle que la valeur de la température en Kelvin s'obtient en ajoutant 273 à la valeur de la température exprimée en degrés Celsius.

- 1 Si on mesure, dans l'air, une longueur d'onde de 77,3 cm pour un son de fréquence 440 Hz, quelle est, dans les mêmes conditions, la longueur d'onde d'ultrasons de fréquence 40 kHz ?
- 2 Dans les mêmes conditions de température, la vitesse du son dans le dihydrogène est environ quatre fois plus grande que dans l'air. Proposez une explication et calculez la longueur d'onde du son de fréquence 440 Hz dans le dihydrogène (dans les conditions de température de l'expérience).
- 3 Les valeurs indiquées à la première question étaient mesurées à 15 °C. Quelle est la longueur d'onde dans l'air d'un son de fréquence 440 Hz si la température vaut 30 °C ?
- 4 Comment peut-on expliquer que vous pouvez entendre une conversation se déroulant dans la pièce à côté lorsque la porte est ouverte même si vous ne vous trouvez pas dans l'alignement de la porte et de la personne qui parle ? Pourquoi l'expérience ne donne-t-elle pas le même résultat avec des ultrasons ?

En effet, un récepteur d'ultrasons ne reçoit aucun signal s'il est situé dans l'autre pièce et si on ne le place pas dans l'alignement de la porte ouverte et de l'émetteur.

Chimie

Objectifs

- ▶ Inventorier les activités du chimiste et les enjeux de la chimie dans la société.
- ▶ Dégager quelques questions qui se posent au chimiste dans ses activités professionnelles.
- ▶ Écrire l'équation de la réaction associée à une transformation d'oxydoréduction et identifier dans cette équation les deux couples mis en jeu.
- ▶ Définir un oxydant et un réducteur.
- ▶ Montrer, à partir de résultats expérimentaux, l'influence des facteurs cinétiques sur la vitesse de réaction.

De nos jours, la Chimie prend une place de plus en plus importante dans les activités humaines.

Le but de ce paragraphe est de répertorier quelles sont les principales activités du chimiste de nos jours :



Texte extrait de « La qualité de l'eau » par Joël Malleval et Thierry Chambolle.
La Recherche n° 221 mai 1990

Lorsqu'on boit de l'eau du robinet, on imagine difficilement la somme de compétences et de technicité qui ont été nécessaires pour en arriver à un acte aussi simple. Il a fallu tout d'abord assurer la gestion de la ressource en eau aussi bien en termes de quantité que de qualité, puis traiter cette eau afin d'éliminer les substances et les micro-organismes susceptibles de présenter un risque pour la santé et, enfin, assurer une qualité parfaite du transport sur des centaines de kilomètres de canalisations et ce, jusqu'au robinet du consommateur. Sensible aux pollutions, l'eau est devenu le produit alimentaire le plus surveillé.

En l'espace de cent ans, les normes françaises ont profondément évolué. Alors qu'en 1885 la potabilité d'une eau était définie à l'aide de six paramètres, il en fallait soixante-deux en 1980 (directive CEE du 15 juillet 1980 qui s'applique à la France). En outre, il s'agissait, au départ, de paramètres simples du type saveur et limpidité. Aujourd'hui, leur liste et les concentrations maximales admissibles (CMA) qui leur sont associées ont été fixées en fonction de différentes nuisances (données toxicologiques, corrosion de canalisations...). Ces normes sont très contraignantes aussi bien pour les techniques analytiques que pour les procédés de traitement qu'elles induisent.

Pour épurer l'eau, il faut généralement combiner plusieurs traitements élémentaires dont les bases peuvent être physiques (techniques séparatives), chimiques (oxydation, désinfection) ou biologiques, et qui ont pour effet d'éliminer les matières en suspension, puis les substances colloïdales et enfin certaines substances dissoutes (minérales ou organiques).

La séparation des particules solides et de l'eau peut se faire selon deux principes différents, à savoir, l'action directe de la pesanteur par simple décantation en fonction du poids spécifique des particules et la filtration sur un milieu granulaire (en général du sable).

Lorsque les eaux brutes après traitement physique préalable comportent des matières organiques dissoutes en quantité appréciable de l'ammoniacale, du fer ou du manganèse des algues ou encore une couleur prononcée, une oxydation préalable permet d'en faciliter l'élimination par les traitements de clarification. Les oxydants utilisés sont le chlore, le dioxyde de chlore, l'ozone ou encore le permanganate de potassium. La désinfection qui se pratique en fin de traitement, a pour but la destruction des bactéries et des virus, ainsi que le maintien sur le réseau de distribution d'un résiduel bactériostatique destiné à éviter la prolifération de micro-organismes telles que les bactéries banales. Là encore, on retrouve le chlore, les chloramines, le dioxyde de chlore et l'ozone.

La filtration sur charbon est souvent précédée d'une oxydation par ozone. Pour éviter la corrosion dans les conduits en fonte ou en acier, il faut que l'eau puisse former une légère couche protectrice formée d'oxyde de fer et de carbonate de calcium ; pour cela, elle doit remplir certaines conditions : teneurs en oxygène dissous et en carbonate de calcium déterminées, pH d'équilibre calcocarbonique. Des traitements de correction ou d'équilibre (neutralisation, decarbonatation et reminéralisation) sont donc susceptibles d'être utilisés.

Activité 1 À partir de ce texte, inventorier les actions que doit mener le chimiste pour obtenir une eau potable.

On le voit sur l'exemple de l'eau, les préoccupations du chimiste sont nombreuses : comprendre les processus d'évolution des systèmes susceptibles de transformations chimiques, les contrôler, maîtriser les protocoles opératoires et disposer d'outils de mesure permettant de réaliser des « contrôles qualité ».

Le rôle du chimiste dans la société est essentiel : en particulier, il doit être sensible aux impacts de ses actions sur l'environnement ainsi que de l'élimination des matériaux.

Les questions qui se posent au chimiste sont les suivantes :

- 1) La transformation d'un système chimique est-elle toujours rapide ?
- 2) La transformation d'un système chimique est-elle toujours totale ?
- 3) Le sens spontané d'évolution d'un système est-il prévisible ?
- 4) Comment contrôler les transformations de la matière ?

L'objectif du programme de la Classe terminale est d'apporter des éléments de réponse à ces questions.

La cinétique chimique est l'étude de l'évolution dans le temps des systèmes chimiques.

Un système chimique est l'ensemble des corps purs mis initialement en présence et appelés **réactifs**.

Le système subit une **transformation chimique** qui a pour conséquence, la modification de la composition dudit système.

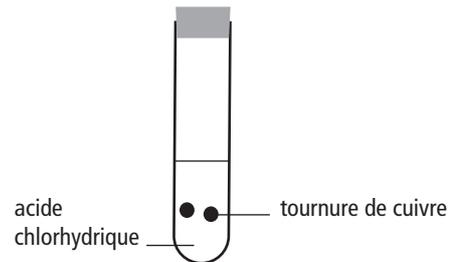
Il se forme alors d'autres corps purs appelés : **produits**.

On associe à cette transformation, un modèle appelé : **réaction chimique** et représenté par son **équation** chimique.

A Quelques exemples de transformations

Voici quelques exemples de transformations subies par des systèmes :

❶ Acide chlorhydrique et cuivre :



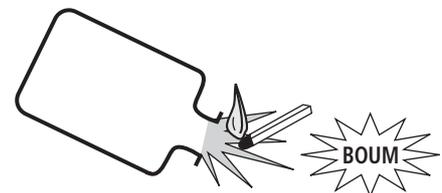
Aucune évolution du système n'est observée

❷ Synthèse de l'eau :



Aucune évolution du système n'est observée.

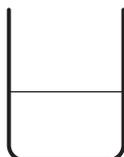
❸ Synthèse de l'eau (bis)



Une explosion se produit dès l'approche d'une flamme, avec apparition de gouttelettes d'eau liquide dans le récipient.

❹ Permanganate de potassium et acide oxalique :

❶

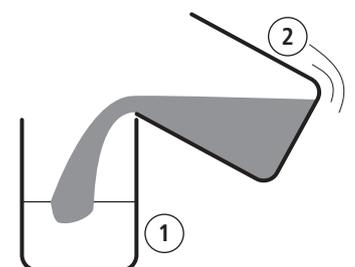


Solution aqueuse d'acide oxalique incolore et de formule $C_2H_2O_4$

❷



Solution de permanganate de potassium violette ($K^+ + MnO_4^-$)

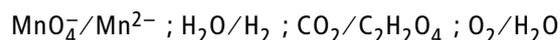


La décoloration se produit quelques minutes après le mélange des solutions 1 et 2

Activité 2 Comparer la durée de chaque transformation.

Activité 3 Écrire l'équation chimique des réactions correspondant aux expériences 3 et 4.

Couples oxydant/réducteur mis en jeu :



B Analyse des résultats

L'expérience 1 met en évidence l'**absence d'évolution** du système (système stable thermodynamiquement) car aucune transformation naturelle (ou spontanée) ne peut se produire. La transformation est **thermodynamiquement impossible**.

Les expériences 2 et 3 montrent qu'un même système, placé dans des conditions expérimentales différentes, peut évoluer ou non.

En effet, dans l'expérience 2, le système ne subit aucune transformation et pourtant une réaction naturelle est possible entre les réactifs. Mais la transformation est **très lente**, voire **infiniment lente** (durée : plusieurs jours, plusieurs mois voire plusieurs années) ; exemple : transformations se produisant lors du vieillissement d'un vin : au bout de quelques années, apparaissent des produits (aldéhydes, acides carboxyliques...) qui modifient son goût.

Par contre, dans l'expérience 3, le même système, placé dans des conditions expérimentales différentes (présence d'une flamme) subit une transformation extrêmement **rapide** (voire quasi-instantanée : de durée inférieure à l'unité de temps : la seconde) ; exemple : la réaction de précipitation du chlorure d'argent AgCl, les réactions explosives...

L'expérience 4 correspond à une transformation **lente**, c'est-à-dire à une transformation allant à son terme au bout de quelques secondes à quelques heures ; exemple : la réaction de dismutation de l'eau oxygénée : antiseptique que l'on peut conserver plusieurs semaines dans son flacon et pourtant la réaction de décomposition de l'eau oxygénée est thermodynamiquement possible (formation d'eau et de dioxygène) mais cette réaction est lente.

Remarque importante

Les qualificatifs « rapide » ou « lent » n'ont pas de définition absolue : ils dépendent, entre autre, de l'instrumentation utilisée : si l'on se contente d'un suivi à l'œil, des modifications de couleur ou d'aspect du système s'effectuant à l'échelle du dixième de seconde (durée de la persistance rétinienne) paraîtront quasi-instantanées.

Par contre avec un instrument d'analyse possédant un temps de réponse de quelques centièmes de seconde, ces mêmes modifications pourront être jugées comme lentes.

A Influence de la concentration des réactifs

Oxydation des ions iodure I^- par l'eau oxygénée H_2O_2

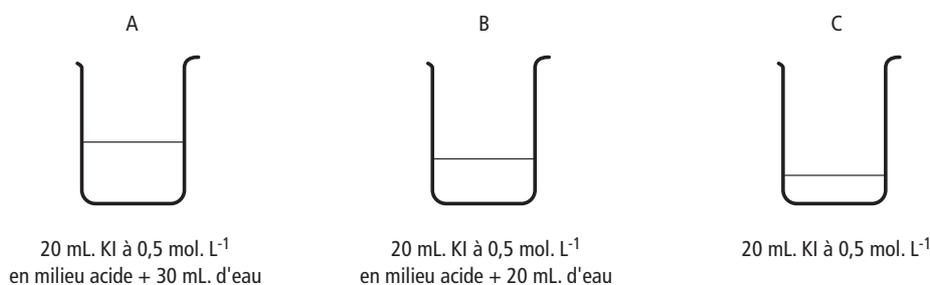
Activité 4 Écrire l'équation de la réaction faisant intervenir les 2 espèces mises en présence.

Données : Couples rédox : I_2/I^- et H_2O_2/H_2O

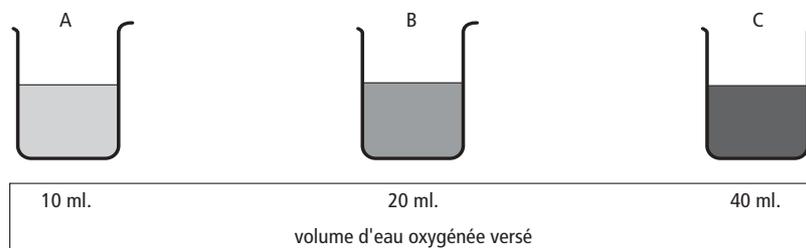
Le diiode formé lors de la transformation est la seule espèce colorée en solution.

On peut donc suivre l'évolution du système à partir de sa couleur (du jaune clair au brun foncé selon la concentration en I_2).

Dans 3 béchers, on prépare 3 solutions d'iodure de potassium (incolore) :



puis, on ajoute simultanément, à la date $t = 0$, de l'eau oxygénée à $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (incolore)



Au bout de quelques minutes nous observons la couleur de la solution : bécher A : jaune pâle, bécher B : orangé ; bécher C : brun foncé.

Activité 5 À quoi est due la coloration progressive de chaque mélange ?

Calculer la concentration de chaque solution A, B et C en eau oxygénée à la date $t = 0$.

Quelle est l'influence de la concentration des réactifs sur la cinétique d'une réaction ? Expliquer.

Interprétation :

En solution, les molécules (ou les ions) des réactifs sont en mouvement incessant et désordonné. Au cours de celui-ci, des rencontres (chocs) intermoléculaires se produisent. Certaines ont pour conséquence la formation de nouvelles entités (ions ou molécules) : les produits.

La vitesse de formation de ces produits est d'autant plus grande que le nombre de ces rencontres est grand (par unité de temps).

Par conséquent, la probabilité de rencontre entre réactifs est plus élevée si, dans un volume donné, le nombre d'entités de réactifs est élevé, c'est-à-dire si la concentration des réactifs est plus élevée.

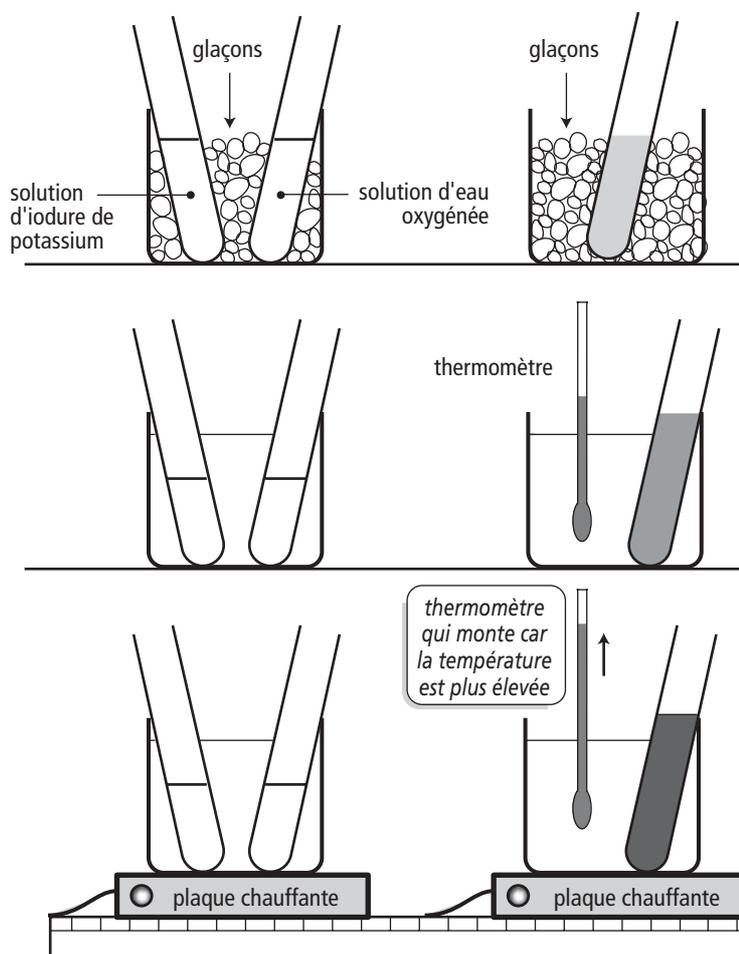
Applications :

- 1) Pour rendre une transformation plus rapide, on augmente la concentration (ou la pression si réactifs gazeux) des réactifs.
- 2) Pour ralentir voire bloquer la transformation, on peut au contraire diluer le milieu réactionnel par ajout de solvant.

B Influence de la température du système

On reprend la même transformation que précédemment, mais en opérant à 3 températures différentes :

À la date $t = 0$, on mélange le contenu des tubes à essais placés dans le même bain thermostaté ; au bout de quelques minutes, on peut observer les résultats ci-dessous :



Activité 6 La vitesse de formation du diiode dépend-elle de la température ? Expliquer.

D'une manière générale, la vitesse d'évolution d'un système chimique croît avec la température.

Interprétation :

Les rencontres ou chocs entre entités réactives ne produisent pas toujours les produits. En effet, la formation des produits nécessite une rupture d'une ou plusieurs liaisons chimiques au niveau des réactifs, ce qui demande de l'énergie qui est prélevée sur les réactifs eux-mêmes.

Si ces réactifs ne possèdent pas l'énergie suffisante, le choc est dit alors inefficace.

À une température donnée, certains chocs sont efficaces (formation des produits), d'autres non. La réaction chimique se produit uniquement lors d'un choc efficace.

Une élévation de température provoque l'accroissement de l'agitation moléculaire c'est-à-dire de l'énergie des espèces chimiques susceptibles de réagir. Par conséquent, le nombre de chocs augmente avec la température et, aussi, le nombre de **chocs efficaces** donc la vitesse de la réaction aussi.

Applications :

Les applications pratiques de l'utilisation de la température comme facteur cinétique, peuvent être classées en 2 catégories :

1) Déclenchement ou augmentation de la vitesse d'une transformation par élévation de la température pour optimiser le coût d'une transformation réalisée à l'échelle industrielle ou pour éliminer des matériaux usés.

2) Blocage ou diminution de la vitesse d'une transformation par abaissement de la température pour éviter les phénomènes de corrosion par exemple.

À noter qu'une **trempe** est un refroidissement brutal de la température d'un système chimique en évolution ; elle a pour but d'en « figer » la composition.

Activité 7 *Trouver au moins 2 applications de l'utilisation de la température comme facteur cinétique, en cuisine : une application avec élévation de température, une avec abaissement de température.*

Résumé

L'objet de la cinétique est l'étude de l'évolution dans le temps de la composition des systèmes chimiques.

On distingue d'une part les transformations thermodynamiquement possibles, des transformations thermodynamiquement impossibles ; parmi les transformations possibles, on distingue alors les transformations rapides (voire instantanées), les transformations lentes et les transformations infiniment lentes.

D'une manière générale, la vitesse d'évolution d'un système chimique croît avec la concentration des réactifs d'une part, avec la température d'autre part.

Une trempe est un refroidissement brutal de la température d'un système chimique en évolution afin d'en « figer » la composition.

E

xercices

Exercice 1 Écriture de réactions d'oxydoréduction

Écrire (en ajustant les nombres stœchiométriques) les équations des réactions chimiques d'oxydoréduction entre les espèces suivantes :

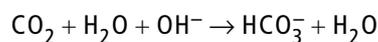
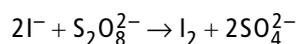
- 1 Ion iodure I^- et ion peroxydisulfate $S_2O_8^{2-}$ (couples : I_2/I^- et $S_2O_8^{2-}/SO_4^{2-}$)
- 2 Ion permanganate MnO_4^- et l'acide oxalique $H_2C_2O_4$ (couples : MnO_4^-/Mn^{2+} et $CO_2, H_2O/H_2C_2O_4$) en milieu acide.

Exercice 2 Vrai ou faux ?

- 1 D'une manière générale, la vitesse d'évolution d'un système chimique croît avec la température.
- 2 D'une manière générale, la vitesse de disparition d'un réactif dépend de sa concentration.
- 3 D'une manière générale, la vitesse de formation d'un produit dépend de sa concentration.
- 4 Une trempe est une opération consistant à diluer de façon importante un système chimique de façon à en figer la composition.

Exercice 3 Identification de réactions

Pour chaque équation chimique de réaction, identifier sa nature (oxydoréduction ou acido-basique) :



Séquence

2

> **Physique :**

Radioactivité

> **Chimie :**

**Suivi de l'évolution
d'un système chimique
dans le temps**

Sommaire

Séquence 2

Physique > Radioactivité

Chapitre 1	>	Le noyau de l'atome	45
		A Composition du noyau	
		B Isotopes	
Chapitre 2	>	Émissions radioactives	47
		A La radioactivité : un phénomène nucléaire	
		B Détection de la radioactivité	
Chapitre 3	>	Les différents types de radioactivité	48
		A Radioactivité α	
		B Radioactivité β^-	
		C Radioactivité β^+	
		D Emission γ	
Chapitre 4	>	Décroissance radioactive	50
		A Évolution d'une population de noyaux radioactifs	
		B Activité d'un échantillon de noyaux radioactifs	
		C Demi-vie d'un nucléide	
		D Loi de décroissance radioactive	
		E L'émission radioactive : un phénomène aléatoire	
Chapitre 5	>	Utilisation et danger des émissions radioactives	53
		A Application à la datation	
		B Dangers de la radioactivité	
	>	Résumé	54
	>	Exercices	55

Chimie > Suivi de l'évolution d'un système chimique dans le temps

Chapitre 1	>	Suivi d'une transformation dans le temps	63
		A Réaction des ions iodure I ⁻ sur l'eau oxygénée H ₂ O ₂	
		B Détermination de la composition d'un système	
		C Exploitation des résultats	
		D Temps de demi-réaction	
Chapitre 2	>	Vitesse de réaction	66
		A Définition	
		B Détermination graphique	
Chapitre 3	>	Le phénomène d'absorption en lumière visible	67
		A Spectres d'absorption et absorbance	
		B Relation entre absorbance et concentration d'une espèce colorée	
		C Conditions de validité de la relation	
Chapitre 4	>	Suivi colorimétrique d'une transformation chimique	69
		A Par échelle de teintes	
		B Par spectrophotométrie	
	>	Résumé	71
	>	Exercice	72

Physique

Objectifs

- ▶ Connaître la composition du noyau de l'atome
- ▶ Savoir écrire les équations des désintégrations radioactives
- ▶ Connaître la définition de la constante radioactive
- ▶ Savoir calculer le temps caractéristique et la demi-vie à partir de la constante radioactive
- ▶ Connaître l'allure et l'équation de la courbe de décroissance radioactive
- ▶ Connaître le principe de la datation au carbone 14
- ▶ Connaître les dangers de la radioactivité

A Composition du noyau

La matière est constituée d'atomes, chaque atome contient un noyau autour duquel se trouve le nuage d'électrons.

Les particules du noyau sont appelées nucléons, il en existe deux sortes : les protons chargés positivement et les neutrons qui ne portent pas de charge électrique.

La masse d'un proton et la masse d'un neutron sont pratiquement égales.

Les électrons se trouvent autour du noyau, chacun porte une charge négative qui compense exactement celle d'un proton. Comme dans un atome, le nombre d'électrons est égal au nombre de protons du noyau (ce nombre est appelé nombre de charge), globalement, l'atome est électriquement neutre. La masse d'un électron est beaucoup plus faible que celle d'un proton ou d'un neutron (environ deux mille fois plus faible).

Particules élémentaires

Nom	Masse (en kg)	Charge (en C)
Proton	$1,67 \cdot 10^{-27}$	$+ 1,6 \cdot 10^{-19}$
Neutron	$1,67 \cdot 10^{-27}$	0
Electron	$9,1 \cdot 10^{-31}$	$- 1,6 \cdot 10^{-19}$

Si le noyau d'un atome contient Z protons et N neutrons, il y a Z électrons autour du noyau.

Z est appelé nombre de charge ou numéro atomique.

Le nombre total de nucléons est appelé nombre de masse, on le note M ou A.

Pour déterminer la composition d'un noyau, il faut donc connaître deux nombres Z et A.

Tous les noyaux identiques (ayant même nombre de charge et même nombre de masse) constituent un seul nucléide.

Si X est le symbole chimique de l'élément auquel appartient le nucléide, celui-ci sera représenté par :



Activité 1 À l'aide des valeurs numériques indiquées dans le tableau ci-dessus, calculer la masse et la charge électrique du noyau de fluor : ${}_{9}^{19}\text{F}$ ainsi que la charge et la masse de l'atome correspondant.

B Isotopes

Deux noyaux appartenant au même nucléide étant identiques, leurs propriétés nucléaires (c'est-à-dire les propriétés du noyau) sont donc identiques.

Les atomes possédant ces noyaux auront le même nombre d'électrons et comme les propriétés chimiques ne dépendent que des électrons, les propriétés chimiques de ces atomes seront identiques.

Lorsque les noyaux de deux atomes appartiennent au même nucléide, on ne peut les différencier ni par les propriétés chimiques de l'atome, ni par les propriétés nucléaires de leurs noyaux.

On appelle isotopes deux noyaux possédant le même nombre de protons mais un nombre différent de neutrons, les deux nucléides auxquels ces deux isotopes appartiennent ont donc même nombre de charge, mais un nombre de masse différent.

Deux noyaux appartenant à deux nucléides isotopes auront donc des propriétés nucléaires différentes puisque leurs noyaux ne seront pas identiques. En revanche, les atomes possédant ces noyaux auront le même nombre d'électrons (puisque les noyaux possèdent le même nombre de protons) et comme les propriétés chimiques ne dépendent que des électrons, les propriétés chimiques de ces atomes seront donc identiques : les deux atomes appartiennent au même élément chimique, et le symbole chimique X de l'élément auquel appartient le nucléide sera le même pour deux isotopes.

Lorsque les noyaux de deux atomes appartiennent à deux nucléides isotopes, on ne peut les différencier par les propriétés chimiques de l'atome mais on peut les différencier par les propriétés nucléaires de leurs noyaux.

Activité 2 On considère trois nucléides caractérisés par leur nombre de charge Z et leur nombre de masse A :

Nucléide 1 : $Z = 11$, $A = 22$; nucléide 2 : $Z = 11$, $A = 23$; nucléide 3 : $Z = 12$, $A = 24$.

Quels sont, parmi ces trois nucléides, les deux noyaux isotopes ?

Rechercher, dans un tableau périodique, le symbole chimique de l'élément auquel appartient chacun des atomes correspondants et écrire chaque nucléide sous la forme A_ZX .

Activité 3 Indiquer la composition du noyau des nucléides suivants : ${}^{12}_6C$, ${}^{14}_7N$ et ${}^{18}_8O$.

À quel symbole chimique (C pour carbone, N pour azote ou O pour oxygène) correspond la lettre X dans le nucléide : ${}^{14}_6X$?

A La radioactivité : un phénomène nucléaire

On appelle radioactivité l'émission de particules de grande énergie par des noyaux peu stables : ces noyaux se transforment et, au cours de la transformation, les particules de grande énergie sont éjectées du noyau.

C'est la grande énergie des particules émises qui a permis de comprendre, dès la découverte de la radioactivité par Becquerel en 1896, que la radioactivité était un phénomène nucléaire (dû à une transformation du noyau) et non un phénomène chimique qui n'aurait concerné que les couches électroniques de l'atome où les énergies mises en jeu sont beaucoup plus faibles.

Activité 4 Rechercher dans une encyclopédie comment Becquerel découvre la radioactivité et à quels scientifiques on doit les premières études sur la radioactivité.

B Détection de la radioactivité

Le schéma de la figure 1 illustre le fonctionnement d'un compteur Geiger. Les particules émises par radioactivité sont ionisantes : elles ont suffisamment d'énergie pour arracher des électrons aux molécules de gaz qu'elles rencontrent sur leur trajet.

Lorsqu'une telle particule de haute énergie pénètre dans le compteur, elle provoque l'ionisation d'un grand nombre de molécules du gaz sous faible pression contenu dans le cylindre.

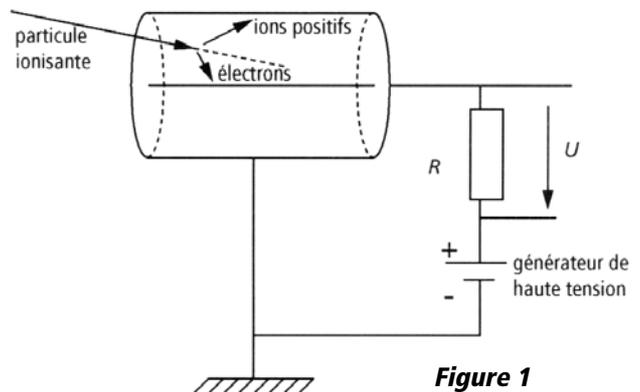


Figure 1

Comme il existe une haute tension entre les parois du cylindre et la tige centrale, les électrons sont attirés puis captés par cette tige, ils parcourent alors le circuit électrique et aboutissent finalement sur les parois du cylindre où ils se recombinent avec les ions : rapidement, le gaz se retrouve dans le même état non ionisé qu'avant le passage de la particule.

Ce déplacement des électrons dans le circuit correspond à un courant électrique d'intensité I entraînant une tension $U = RI$ aux bornes de la résistance. La détection de particules radioactives est basée sur l'existence de cette tension qui peut, après amplification, être envoyée sur un compteur d'impulsions ou sur un haut-parleur (on entendra alors un « bip » sonore lorsqu'une particule radioactive pénètre dans le compteur).

Il existe aussi d'autres moyens de détecter la radioactivité comme les films-dosimètres portés par les agents qui travaillent dans les centrales nucléaires : une pellicule photographique est enfermée dans un boîtier opaque à la lumière. Les particules émises par radioactivité traversent le boîtier et impressionnent la pellicule dont le noircissement plus ou moins grand permet de connaître la quantité de particules absorbées.

Activité 5 Indiquer, sur le schéma de la figure 1, le sens de déplacement des électrons dans le circuit et le sens du courant électrique dans la résistance R .

A Radioactivité α

Un nucléide est dit radioactif α (prononcer « alpha »), s'il se transforme en émettant une particule α composée de deux protons et de deux neutrons. Comme cette particule α n'est autre qu'un noyau d'hélium, on l'appelle aussi parfois « hélion » et on la représente par : ${}^4_2\text{He}$.

Le noyau père (celui qui a émis la particule) a donc perdu deux protons : son nombre de charge diminue de deux unités, il a aussi perdu deux neutrons, soit au total quatre nucléons : son nombre de masse diminue de quatre unités. Si on note Z le nombre de charge du noyau père et A son nombre de masse, le noyau-fils (c'est-à-dire le noyau restant après l'émission radioactive) aura donc pour nombre de charge $Z - 2$ et pour nombre de masse $A - 4$.

On représente donc cette désintégration par l'équation : ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\text{X} + {}^4_2\text{He}$.

À titre d'exemple, on écrira ainsi la désintégration radioactive du radium 226 (on ne précise que le nombre de masse 226 puisque tous les atomes de radium ont un noyau caractérisé par le même nombre de charge 88) : ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$ puisque le noyau dont le nombre de charge vaut 86 appartient à l'élément radon de symbole Rn.

Activité 6 Écrire l'équation de la désintégration α du Polonium 210 : ${}^{210}_{84}\text{Po}$ et de l'uranium 238 ; ${}^{238}_{92}\text{U}$ (il vous faudra rechercher les symboles des noyaux fils dans un tableau périodique des éléments).

B Radioactivité β^-

Un nucléide est dit radioactif β^- (prononcer « bêta moins »), s'il se transforme en émettant un électron. Comme l'électron possède une charge électrique opposée à celle du proton, on lui attribue un nombre de charge égal à -1 et on lui attribue un nombre de masse nulle puisqu'il n'y a pas de nucléons dans un électron !!

Il peut paraître bien étonnant qu'un électron puisse sortir du noyau puisque celui-ci n'en contient pas ! En fait, l'émission d'un électron correspond à la transformation dans le noyau d'un neutron (nombre de charge = 0, nombre de masse = 1) en un proton (nombre de charge = 1, nombre de masse = 1) plus un électron (nombre de charge = -1 , nombre de masse = 0), ce qu'on écrit en notant « p » le proton, « n » le neutron et « e » l'électron : ${}^1_0\text{n} \rightarrow {}^1_1\text{p} + {}^0_{-1}\text{e}$.

Globalement, le noyau père et le noyau fils posséderont le même nombre de masse (proton et neutron sont tous deux des nucléons) mais le nombre de charge du noyau fils sera supérieur d'une unité : il aura gagné un proton.

On représente donc cette désintégration par l'équation : ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z+1}\text{X} + {}^0_{-1}\text{e}$.

À titre d'exemple, on écrira ainsi la désintégration radioactive du césium 137 : ${}^{137}_{55}\text{Cs} \rightarrow {}^{137}_{56}\text{Ba} + {}^0_{-1}\text{e}$.

Activité 7 Écrire l'équation de la désintégration β^- du Césium 139 : ${}^{139}_{55}\text{Cs}$ et du phosphore 32 : ${}^{32}_{15}\text{P}$.

C Radioactivité β^+

Un nucléide est dit radioactif β^+ (prononcer « bêta plus »), s'il se transforme en émettant un positon. Le positon n'existe pas naturellement et la radioactivité β^+ ne s'observe que sur des noyaux artificiels (obtenus en bombardant de particules des noyaux existant naturellement).

Comme le positon possède une charge électrique opposée à celle de l'électron, donc égale à celle du proton, on lui attribue un nombre de charge égal à +1 et, comme sa masse est la même que celle de l'électron, on lui attribue un nombre de masse nulle (il n'y a pas de nucléons dans un positon !!).

Il peut, là aussi, paraître bien étonnant qu'un positon puisse sortir du noyau puisque celui-ci n'en contient pas !

En fait, l'émission d'un positon correspond à la transformation dans un noyau très énergétique (obtenu artificiellement) d'un proton (nombre de charge = 1, nombre de masse = 1) en un neutron (nombre de charge = 0, nombre de masse = 1) plus un positon (nombre de charge = 1, nombre de masse = 0), ce qu'on écrit en notant « n » le neutron, « p » le proton et « e » le positon : ${}^1_1\text{p} \rightarrow {}^1_0\text{n} + {}^0_1\text{e}$.

On remarquera qu'on note par la même lettre « e » l'électron et le positon, mais qu'on les distingue aisément par la valeur de leur nombre de charge.

Globalement, le noyau père et le noyau fils contiennent le même nombre de masse mais le nombre de charge du noyau fils sera inférieur d'une unité : il a perdu un proton.

On représente donc cette désintégration par l'équation : ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z-1}\text{X} + {}^0_1\text{e}$.

À titre d'exemple, on écrira ainsi la désintégration radioactive du phosphore 30 : ${}^{30}_{15}\text{P} \rightarrow {}^{30}_{14}\text{Si} + {}^0_1\text{e}$.

Activité 8 Écrire l'équation de la désintégration β^+ de l'azote 13 : ${}^{13}_7\text{N}$.

D Émission γ

La plupart des réactions radioactives (α , β^- et β^+) s'accompagnent de l'émission d'un rayonnement γ (prononcer « gamma »). Il ne s'agit pas à proprement parler de l'émission d'une particule matérielle mais d'un rayonnement électromagnétique de même nature que la lumière visible mais de bien plus grande énergie (de plus courte longueur d'onde). Le noyau obtenu à l'issue d'une désintégration α ou β est souvent dans un état excité : il possède trop d'énergie (on le note alors avec un astérisque :

${}^A_Z\text{X}^*$) et il perd cet excès d'énergie en émettant un rayonnement γ : ${}^A_Z\text{X}^* \rightarrow {}^A_Z\text{X} + \gamma$.

Rappelons que les rayons ultra-violetts transportent déjà plus d'énergie que la lumière visible, et qu'au delà des U.V., existent les rayons X, puis les rayons γ de plus en plus énergétiques.

Comme il ne s'agit pas de l'émission de particules matérielles (même si l'on peut considérer que les rayonnements électromagnétiques sont constitués de particules appelées photons, ces particules n'ont ni masse ni charge), il n'y a pas lieu d'écrire d'équation pour illustrer l'émission γ , mais il faut savoir que ces rayonnements très énergétiques qui accompagnent la plupart des réactions nucléaires sont très dangereux par leur capacité à détruire les cellules vivantes (ils sont utilisés pour détruire des cellules malades dans le traitement des cancers).

A Évolution d'une population de noyaux radioactifs

Supposons qu'on dispose, à un instant t , d'un certain nombre N de noyaux radioactifs identiques.

Appelons ΔN la variation de ce nombre de noyaux radioactifs identiques pendant l'intervalle de temps Δt .

Bien entendu, ΔN sera négatif car le nombre de noyaux va diminuer, ceux-ci se transformant en noyaux fils par radioactivité.

Il vous semblerait sans doute plus logique d'étudier la diminution du nombre de noyaux (qui serait positive) plutôt que leur variation (négative), mais d'un point de vue mathématique, il est toujours préférable d'étudier la variation d'une grandeur.

Par ailleurs, plus le nombre N est grand, plus il y aura de désintégrations pendant l'intervalle de temps Δt , si bien que la variation ΔN est proportionnelle à N .

D'autre part, et à condition que Δt soit petit, la variation ΔN est également proportionnelle à Δt .

On résume ces résultats dans la formule :

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t$$

La grandeur notée λ , qui s'exprime en s^{-1} (ou éventuellement en min^{-1} ou h^{-1} ...) est appelée constante radioactive du nucléide étudié, elle a une valeur caractéristique de ce nucléide : tous les nucléides ne se désintègrent pas aussi rapidement les uns que les autres.

La relation : $\Delta N = -\lambda N \Delta t$ vous paraît sans doute simple (elle l'est !), mais elle recèle une constatation étonnante : si vous disposez, à l'instant t , d'une population identique de N noyaux radioactifs, la variation ΔN sera la même si ces noyaux viennent d'être obtenus (par irradiation ou transformation radioactive de noyaux naturels) ou s'ils ont été obtenus longtemps auparavant (du moment qu'il reste bien N noyaux radioactifs identiques à la date t). Autrement dit, les noyaux ne vieillissent pas, leur probabilité de se désintégrer reste la même quel que soit leur âge !

Activité 9 *Supposons que vous disposiez d'un million de noyaux radioactifs identiques, ayant une chance sur mille de se désintégrer à chaque seconde. Quelle serait la variation du nombre de ces noyaux lors de la première seconde de comptage, lors de la deuxième ?*

Quelle serait la valeur de la constante radioactive λ du nucléide étudié ?

B Activité d'un échantillon de noyaux radioactifs

L'activité A d'un échantillon radioactif mesure le nombre de désintégrations par unité de temps.

Comme nous notons ΔN la variation (négative) du nombre de noyaux radioactifs identiques pendant l'intervalle de temps Δt , le nombre de désintégrations pendant cet intervalle de temps vaut « $-\Delta N$ ».

L'activité, exprimée en becquerel (Bq), s'exprime donc par la relation :

$$A = \frac{-\Delta N}{\Delta t} = \lambda N$$

Activité 10

Exprimer, en « becquerel, l'activité de l'échantillon d'un million de noyaux identiques à ceux étudiés dans l'activité précédente.

Au bout de 11 minutes et trente secondes, la moitié des noyaux radioactifs a été désintégrée pour donner des noyaux stables (non radioactifs). Quelle est alors l'activité de l'échantillon ?

C Demi-vie d'un nucléide

Comme la constante radioactive λ est homogène à l'inverse d'une durée (elle s'exprime en s^{-1}), il suffit pour obtenir une durée caractérisant la rapidité avec laquelle se désintègre un nucléide de prendre l'inverse de cette constante radioactive. Cette durée, appelée temps caractéristique de la décroissance radioactive, est notée τ (prononcer « tau ») :

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

On appelle demi-vie T d'un nucléide le temps au bout duquel la moitié des noyaux radioactifs a été désintégrée. La demi-vie T est caractéristique du nucléide étudié, elle ne dépend pas du nombre de

noyaux que contient l'échantillon et vaut : $T = \tau \ln 2 = \frac{\ln 2}{\lambda}$.

Dans cette expression, $\ln 2$ se lit « logarithme népérien de 2 » et vaut 0,69.

Ainsi, si l'on dispose d'un échantillon contenant N_0 noyaux radioactifs identiques de demi-vie T , il ne restera plus que $\frac{N_0}{2}$ noyaux non désintégrés au bout d'une durée égale à T . Et comme, la demi-vie ne dépend pas du nombre de noyaux que contient l'échantillon, au bout d'une durée égale à $2T$, le nombre de noyaux non désintégrés aura encore été divisé par deux, il n'en

restera plus que $\frac{N_0}{4}$ et ainsi de suite, le nombre de noyaux non désintégrés étant à nouveau divisé par deux lors de chaque durée supplémentaire égale à une demi-vie.

La courbe de décroissance radioactive, représentant les variations en fonction du temps du nombre de noyaux non désintégrés, a finalement l'allure représentée sur la figure 2.

La demi-vie est aussi appelée parfois « période de désintégration », mais c'est un terme impropre puisqu'il ne s'agit pas d'un phénomène évoluant de façon périodique.

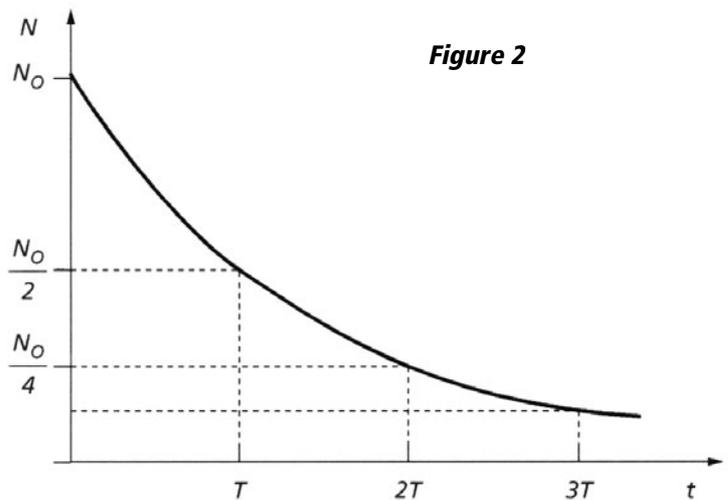


Figure 2

Activité 11

Si l'on dispose de deux échantillons contenant autant de noyaux radioactifs, identiques au sein d'un même échantillon mais différents d'un échantillon à l'autre et caractérisés par des constantes radioactives respectives λ_1 et λ_2 , dans lequel des deux échantillons la décroissance sera-t-elle plus rapide si λ_1 est supérieur à λ_2 ?

Activité 12 Compléter la courbe de la figure 2 en indiquant le nombre de noyaux non désintégrés au bout d'une durée égale à trois fois la demi-vie. Combien en resterait-il au bout d'une durée égale à quatre fois la demi-vie ?

Activité 13 Calculer la demi-vie du nucléide étudié dans l'activité 9. Comparer à la valeur donnée dans l'activité 10.

D Loi de décroissance radioactive

En toute rigueur, la relation : $\Delta N = -\lambda N \Delta t$ n'est exacte que si la variation ΔN du nombre de noyaux et l'intervalle de temps Δt sont extrêmement petits : on les note alors respectivement dN et dt .

L'équation s'écrit donc sous la forme : $\frac{dN}{N} = -\lambda N dt$ et vous verrez en mathématiques comment on peut intégrer cette équation pour obtenir la relation permettant de connaître N en fonction du temps.

Il nous suffit de connaître le résultat : $N = N_0 e^{-\lambda t}$, ce qui se lit « N égale N_0 exponentielle moins λt » et de savoir l'exploiter à l'aide d'une calculatrice comme le propose l'activité 14.

Activité 14 On dispose de $6,0 \cdot 10^{10}$ noyaux radioactifs ayant une demi-vie égale à 230 s, donc une constante radioactive de valeur : $3,0 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

Pour calculer le nombre de noyaux non désintégrés au bout d'une minute, il faut d'abord calculer le terme « $-\lambda t$ » qui vaut « $-0,18$ ». Vous devez ensuite calculer $e^{-0,18}$ en tapant sur votre calculatrice « e^X » puis « $-0,18$ ». En validant cette expression, vous devez lire « $0,835\dots$ » qu'il suffit de multiplier par $6,0 \cdot 10^{10}$ pour obtenir le résultat final : $5,0 \cdot 10^{10}$.

Procédez de la même façon pour calculer le nombre de noyaux non désintégrés au bout de cinq minutes.

Calculer le pourcentage de noyaux non désintégrés au bout de 7 min 40 s.

E L'émission radioactive : un phénomène aléatoire

Supposons que nous disposions d'un échantillon de plusieurs millions de noyaux radioactifs dont la demi-vie serait de plusieurs milliers d'années. Le nombre de noyaux non désintégrés varierait si peu dans une journée que l'on pourrait supposer qu'un compteur Geiger réglé pour mesurer le nombre de désintégrations par minute donnerait toujours le même résultat dans la journée. L'expérience montre qu'au cours d'une telle expérience, le compteur affiche des mesures regroupées autour d'une valeur moyenne mais tantôt plus élevées que la précédente, tantôt plus faible. Ceci s'explique par le fait que la désintégration des noyaux est aléatoire : chaque noyau d'un même nucléide a la même probabilité de se désintégrer dans la minute qui vient, mais il est impossible de savoir lequel se désintégrera. Comme les comptages portent généralement sur un très grand nombre de noyaux, les valeurs mesurées sont assez bien regroupées et pour caractériser le regroupement des mesures autour de la moyenne, on utilise les notions de variance ou d'écart-type (voir activité 15).

Activité 15 Placé dans le voisinage d'une source radioactive de très longue demi-vie, un compteur Geiger fournit les résultats suivants : 1 269 ; 1 213 ; 1 311 ; 1 260 ; 1 198 ; 1 237 ; 1 287 ; 1 225.

Calculer la moyenne de ces huit mesures.

Calculer l'écart de chaque mesure par rapport à la moyenne et en déduire la variance (moyenne du carré des écarts) puis l'écart-type (racine carrée de la variance).

A Application à la datation

Le carbone 14 : $^{14}_6\text{C}$, isotope du carbone 12 : $^{12}_6\text{C}$, est produit dans la haute atmosphère où il forme du dioxyde de carbone avec le dioxygène de l'air. Comme les plantes (et tout organisme vivant) absorbent du dioxyde de carbone, elles contiennent, comme l'atmosphère, une très faible proportion de carbone 14. Cette proportion reste constante pendant toute la durée de vie de la plante car elle absorbe constamment du dioxyde de carbone, mais la proportion chute dès que la plante meurt car le carbone 14 est radioactif β^- et se désintègre avec une demi-vie $T = 5\,700$ ans.

On peut mesurer ainsi l'activité d'un objet fossile et la comparer à l'activité de la plante vivante ayant servi à élaborer cet objet.

Ceci permet de dater des objets anciens datant de plusieurs milliers d'années. Cette méthode est basée sur l'hypothèse que le taux de carbone 14 dans l'atmosphère n'a pas varié au cours de cette durée, de nombreuses vérifications sur des objets datés par les historiens ont montré que la méthode était fiable avec une assez bonne précision.

Activité 16 *On compare l'activité β^- d'un spécimen en bois trouvé dans une tombe égyptienne et l'activité d'un spécimen analogue encore vivant.*

Quel est l'âge du spécimen égyptien si son activité ne vaut plus que la moitié de celle du spécimen encore vivant ?

En vous aidant de la courbe tracée sur la figure 2, déterminer approximativement l'âge du spécimen égyptien si son activité vaut 60 % de celle du spécimen encore vivant.

B Dangers de la radioactivité

Tous les rayonnements ionisants sont dangereux car ils sont susceptibles d'arracher des électrons aux molécules des tissus biologiques qu'ils traversent. Au niveau de la cellule, la lésion de l'ADN peut provoquer la mort de la cellule ou entraîner des mutations dans la transmission génétique.

Il existe une irradiation naturelle due aussi bien au rayonnement cosmique qu'à la radioactivité naturelle des roches (différente selon les sols), et même une radioactivité naturelle d'environ dix mille becquerels émise par un corps humain (par le potassium qu'il contient). À ces doses très faibles et du fait des capacités régénératrices des cellules, la radioactivité est inférieure au seuil d'apparition d'effets significatifs mais la mise en présence d'objets contaminés peut provoquer de graves maladies ou même le décès des personnes irradiées selon la dose reçue.

On distingue trois types de contamination d'un être vivant : l'exposition externe lorsque l'individu se trouve placé sur le trajet de rayonnements ionisants, la contamination externe ou cutanée lorsque les substances radioactives sont placées sur la peau et enfin l'exposition ou contamination interne lorsque des sources radioactives ont été ingérées par l'organisme.

Dans le cas des radioactivités α et β , le danger vient surtout des contaminations internes car ces émissions ne peuvent parcourir de grandes distances dans l'air (elles interagissent avec les molécules qu'elles rencontrent). Mais les rayons γ , qui sont très pénétrants, sont dangereux quel que soit le type de contamination.

Activité 17 *Rechercher sur une documentation le pictogramme révélant la présence de rayonnements ionisants de façon à mettre en garde contre les dangers liés à une éventuelle contamination.*

Résumé

► Le noyau de l'atome contient des protons et des neutrons. On appelle nombre de charge Z le nombre de protons et nombre de masse A le nombre total de nucléons (protons et neutrons).

► Deux nucléides isotopes sont caractérisés par un même nombre de charge et un nombre de masse différent (même nombre de protons mais nombre différent de neutrons).

► Équation d'une désintégration α : ${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}X + {}^4_2\text{He}$.

Équation d'une désintégration β^- : ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}X + {}^0_{-1}e$.

Equation d'une désintégration β^+ : ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}X + {}^0_1e$.

L'émission γ consiste en un rayonnement électromagnétique de haute énergie.

► La variation ΔN du nombre de noyaux radioactifs identiques pendant l'intervalle de temps Δt est donnée par l'expression : $\Delta N = -\lambda N \Delta t$ dans laquelle la grandeur notée λ , qui s'exprime en s^{-1} , est appelée constante radioactive du nucléide étudié.

► L'activité A d'un échantillon radioactif mesure le nombre de désintégrations par unité de temps. Elle s'exprime en fonction de la constante radioactive et du nombre de noyaux radioactifs contenus dans l'échantillon par la relation : $A = \frac{-\Delta N}{\Delta t} = \lambda N$. Elle s'exprime en becquerel (Bq) et se mesure à l'aide d'un compteur Geiger.

► Le temps caractéristique τ de la décroissance radioactive est l'inverse de la constante radioactive :

$\tau = \frac{1}{\lambda}$. On appelle demi-vie T d'un nucléide le temps au bout duquel la moitié des noyaux radioactifs

a été désintégrée, elle est donnée par l'expression : $T = \tau \ln 2 = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,69}{\lambda}$.

► La mesure de la date d'un échantillon fossile peut être faite en mesurant son taux de radioactivité dû au carbone 14.

► Tous les rayonnements ionisants sont dangereux car ils sont susceptibles de léser les tissus biologiques qu'ils traversent.

Exercices

Ces exercices doivent être résolus avec l'aide d'un tableau périodique des éléments.

Connaître la composition du noyau de l'atome

Exercice 1 Masse volumique du noyau

Le nickel métallique est constitué exclusivement de noyaux appartenant au nucléide : ${}^{58}_{28}\text{Ni}$.

Le noyau peut être assimilé à une boule de rayon $r = 5,1 \cdot 10^{-15}$ m (5,1 femtomètres) alors que, compte tenu du cortège électronique, l'encombrement total de l'atome correspond à celui d'une boule de rayon $R = 1,24 \cdot 10^{-10}$ m (124 picomètres).

1 Calculer la masse de l'atome de nickel ainsi que sa masse volumique.

La masse volumique du nickel métallique vaut $8\,900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Comment expliquer la différence avec le résultat trouvé précédemment ?

2 Calculer la masse de ce noyau ainsi que sa masse volumique que l'on comparera à celle de l'atome.

3 Comment peut-on expliquer que des protons, confinés dans un volume aussi étroit que celui du noyau, ne se repoussent pas ?

Données : masse d'un nucléon : $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg, masse d'un électron : $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg.

Volume V d'une boule de rayon R : $V = \frac{4}{3} \pi R^3$.

Exercice 2 Isotopes de l'hydrogène

L'hydrogène naturel est essentiellement constitué d'hydrogène 1 dont le noyau ne contient qu'un proton, mais il existe aussi (en proportion de 0,015 %) un isotope, appelé hydrogène 2 ou deutérium dont le noyau contient un proton et un neutron ; il existe un autre isotope, artificiel celui-là, dont le noyau contient un proton et deux neutrons.

1 Écrire ces trois isotopes sous la forme : ${}^A_Z\text{X}$.

2 Bien entendu, les atomes possédant ces noyaux isotopes ont les mêmes propriétés chimiques.

En particulier, ils peuvent donner de l'eau. À l'aide des données numériques de l'exercice précédent et en considérant que les atomes d'oxygène ne sont constitués que du nucléide : ${}^{16}_8\text{O}$, calculer la masse m_1 d'une molécule d'eau constituée de deux atomes d'hydrogène 1 et la masse m_2 d'une molécule d'eau constituée d'un atome d'hydrogène 1 et d'un atome d'hydrogène 2 puis le rapport $\frac{m_2}{m_1}$.

Exercice 3 Couples d'isotopes

Associer par couples d'isotopes les différents nucléides énumérés ci-dessous :

${}^{59}_{27}\text{X}$; ${}^{238}_{92}\text{X}$; ${}^{63}_{29}\text{X}$; ${}^{38}_{18}\text{X}$; ${}^{56}_{26}\text{X}$; ${}^{55}_{26}\text{X}$; ${}^{65}_{29}\text{X}$; ${}^{235}_{92}\text{X}$; ${}^{58}_{27}\text{X}$; ${}^{35}_{17}\text{X}$; ${}^{40}_{18}\text{X}$; ${}^{37}_{17}\text{X}$.

Dans la réponse, on remplacera la lettre X par le symbole de l'élément chimique auquel appartient chaque nucléide.

►►► **Savoir écrire les équations des désintégrations radioactives**

Exercice 4 **Stabilité des noyaux**

Dans cet exercice, on note Z le nombre de charge et N le nombre de neutrons dans le noyau.

Les noyaux stables (ceux qui ne se décomposent pas par radioactivité naturelle) ont à peu près autant de neutrons que de protons : $N = Z$ tant que Z est inférieur à 30 mais le nombre de neutrons est supérieur au nombre de protons pour les noyaux plus lourds.

Attention : ceci ne constitue qu'une vague indication de la zone dans laquelle on trouve les noyaux stables dans un diagramme sur lequel on porte N en ordonnée et Z en abscisse (il serait utile de regarder dans un manuel de physique le diagramme complet). En fait, les noyaux stables, forment dans le diagramme (N, Z) une zone dite « vallée de stabilité ».

① Les nucléides radioactifs β^- sont caractérisés par un excès de neutrons. Où se situe un tel nucléide, sur un diagramme (N, Z) par rapport à un noyau stable de même nombre de charge ? Représenter sur le même diagramme le noyau père et le noyau fils. L'émission radioactive a-t-elle entraîné un rapprochement ou un éloignement par rapport à la « vallée de stabilité » ?

② Les nucléides radioactifs β^+ sont caractérisés par un défaut de neutrons. Où se situe un tel nucléide, sur un diagramme (N, Z) par rapport à un noyau stable de même nombre de charge ? Représenter sur le même diagramme le noyau père et le noyau fils. L'émission radioactive a-t-elle entraîné un rapprochement ou un éloignement par rapport à la « vallée de stabilité » ?

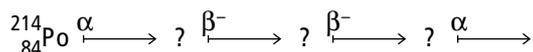
③ Les deux groupes de trois nucléides ci-dessous sont constitués d'un nucléide stable, indiqué en premier, et de deux nucléides radioactifs (β^- ou β^+).

Préciser, pour chaque nucléide radioactif, le type de radioactivité observée et écrire l'équation de désintégration.

Isotopes de l'iode : ${}_{53}^{127}\text{I}$; ${}_{53}^{119}\text{I}$; ${}_{53}^{133}\text{I}$; isotopes du carbone : ${}_{6}^{12}\text{C}$; ${}_{6}^{11}\text{C}$; ${}_{6}^{14}\text{C}$.

Exercice 5 **Famille radioactive**

Plusieurs nucléides appartiennent à une même famille radioactive, s'ils peuvent être obtenus par une suite de désintégrations radioactives à partir d'un nucléide initial. Préciser les nucléides formant la famille radioactive du polonium 214 en complétant la suite ci-dessous (le type de radioactivité est indiquée sur la flèche, on ne demande pas d'écrire les particules émises).



Exercice 6 **Isotopes de l'oxygène**

① L'oxygène naturel contient presque exclusivement le nucléide : ${}_{8}^{16}\text{O}$. En déduire la masse molaire atomique de l'oxygène. Nombre d'Avogadro : $N = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

② Il y a en fait, dans l'oxygène naturel de très faibles proportions d'oxygène 17 et d'oxygène 18, tous deux radioactifs β^- . Écrire les équations des deux désintégrations radioactives.

③ L'oxygène 15, isotope artificiel de l'oxygène, est radioactif β^+ . Écrire l'équation de cette désintégration radioactive.

►►► **Connaître la définition de la constante radioactive**

Exercice 7 **Isotope 131 de l'iode**

L'iode 131 : ${}_{53}^{131}\text{I}$ est radioactif β^- .

① Écrire l'équation de sa désintégration radioactive.

- ② Une source contenant 10^{10} noyaux d'iode 131 a une activité de 10^4 Bq . Calculer la constante radioactive de ce nucléide.
- ③ Combien de noyaux de cette source se désintègrent au bout de la première seconde de comptage ? au bout de la première minute ?

☛ **Savoir calculer le temps caractéristique et la demi-vie à partir de la constante radioactive. Connaître l'allure et l'équation de la courbe de décroissance radioactive**

Exercice 8 Activité d'un échantillon de plomb 212

On mesure, à différentes dates, l'activité d'un échantillon contenant 10^{12} noyaux de plomb 212 : $^{212}_{82}\text{Pb}$ qui est radioactif β^- . Les résultats sont consignés dans le tableau ci-dessous :

Activité (en 10^6 Bq)	18,0	16,9	14,8	12,2	10,0	8,2	6,7	5,5	3,7	2,5	1,8	1,3
Date (en heures)	0	1	3	6	9	12	15	18	24	30	35	40

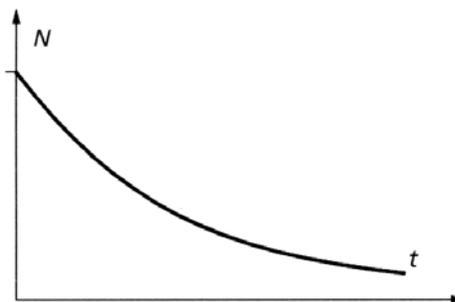
- ① Tracer la courbe représentant les variations de l'activité en fonction du temps.
- ② Expliquer pourquoi cette courbe a la même allure que la courbe représentant les variations du nombre de noyaux non désintégrés en fonction du temps.
- ③ Calculer la constante radioactive du plomb 212 à partir de la valeur initiale de l'activité. En déduire le temps caractéristique de cette désintégration.
- ④ Déduire de la courbe la demi-vie de ce nucléide. Vérifier que ce résultat est compatible avec la valeur de la constante radioactive déterminée à la question précédente.

Exercice 9 Isotope 216 du polonium

La courbe ci-contre représente les variations du nombre de noyaux de polonium 216 non désintégrés en fonction du temps.

Sur l'axe des abscisses, 1 cm représente 0,1 s.

- ① Écrire l'équation de désintégration α du polonium 216.
- ② Déduire de cette courbe la demi-vie du polonium 216 puis calculer la valeur de sa constante radioactive.
- ③ Sachant que l'activité initiale A_0 de l'échantillon vaut $6,5 \cdot 10^5$ Bq , préciser l'échelle de graduation de l'axe des ordonnées en indiquant le nombre de noyaux que représente 1 cm le long de cet axe.



Exercice 10 À vos calculettes !

On étudie un échantillon contenant, à la date $t = 0$, $N_0 = 1,0 \cdot 10^{10}$ noyaux de césium 139 : $^{139}_{55}\text{Cs}$ qui est radioactif β^- avec une demi-vie égale à $T = 7$ min . On note N le nombre de noyaux non désintégrés à la date t.

- ① Pour calculer le nombre de noyaux non désintégrés au bout d'un nombre entier de demi-vies, on pose $t = nT$. Donner l'expression littérale de N en fonction de N_0 et de t.

En déduire la valeur de N pour $n = 4$.

La relation obtenue est-elle valable quel que soit n ? (on pourra, à titre d'exemple, calculer la valeur qu'elle donne pour N au bout de 7 heures).

② En dehors des restrictions apportées lors de la question précédente, la relation obtenue est valable quel que soit le mode de désintégration radioactive et même si n n'est pas un nombre entier. Calculer N lorsque $t = \frac{T}{2}$ (soit la moitié d'une demi-vie).

③ La relation obtenue peut aussi s'écrire sous la forme : $N = N_0 e^{-\lambda t}$.

a) Déterminer la valeur de la constante radioactive du césium 139 puis la valeur du produit λt lorsque $t = 3,5$ min (soit la moitié d'une demi-vie).

b) Calculer sur votre calculette $e^{-\lambda t}$ lorsque $t = 3,5$ min et vérifier que vous obtenez bien le même résultat qu'à la question 2.

Exercice 11 Radioactivité du radium 226

Un compteur Geiger est placé dans le voisinage d'un échantillon contenant un peu de radium 226 qui est radioactif α .

Pendant une semaine, on mesure au compteur Geiger le nombre de désintégrations enregistrées chaque jour entre 7 h 00 min et 7 h 01 min.

On obtient les résultats suivants :

Lundi : 7 703 ; mardi : 7 653 ; mercredi : 7 511 ; jeudi : 7 642 ; vendredi : 7 695 ; samedi : 7 590 ; dimanche : 7 786.

① La demi-vie de ce nucléide est-elle supérieure ou inférieure à une journée?

② Calculer la valeur moyenne, la variance et l'écart-type de cet ensemble de mesures.

Exercice 12 Loi de décroissance radioactive

À la date $t = 0$, un échantillon contient 80 milliards de noyaux radioactifs d'un nucléide dont la demi-vie vaut $T = 2$ h 00 min.

① Calculer la constante radioactive de ce nucléide.

② Calculer, après chaque heure écoulée depuis la date $t = 0$ jusqu'à $t = 10$ heures, le nombre de noyaux non désintégrés dans cet échantillon.

➡ **Connaître le principe de la datation au carbone 14**

Exercice 13 Datation et radioactivité

Le carbone 14, produit en faible quantité dans la haute atmosphère, est absorbé sous forme de dioxyde de carbone, par les végétaux. Le carbone 14 est radioactif β^- , sa demi-vie vaut 5 700 ans.

① Écrire l'équation de désintégration du carbone 14.

② Expliquer pourquoi la proportion de carbone 14 par rapport au carbone 12 est constante dans un arbre vivant et pourquoi elle diminue quand l'arbre a été abattu.

③ Au bout de combien de temps la proportion de carbone 14 aura-t-elle diminué de moitié ? Comment effectuer cette mesure ?

④ Il existe d'autres méthodes de datation basée sur l'étude de la radioactivité. Ainsi, la transmutation de l'isotope 40 du potassium en argon avec une demi-vie de 1,5 milliard d'années, permet de dater la roche en comparant les quantités de potassium 40 et d'argon (généralement retenu dans la roche).

Comparer les demi-vies du carbone 14 et du potassium 40. Sont-ils utilisables pour des datations concernant les mêmes tranches d'âge ?

➡ **Connaître les dangers de la radioactivité**

Exercice 14 Radioactivité de l'iode

Lors de la catastrophe de Tchernobyl, de nombreux corps radioactifs ont été rejetés dans l'atmosphère, en particulier de l'iode 131 qui est émetteur β^- et γ (demi-vie = 8 jours).

- ① Écrire l'équation de cette désintégration radioactive.
- ② L'iode 131 déposé par le nuage radioactif peut ensuite être ingéré sous forme d'aliment ; dans l'organisme, l'iode se fixe préférentiellement sur la thyroïde.
 - Pourquoi la radioactivité est-elle dangereuse pour les organismes vivants ?
 - Pour la protection des populations, il est prévu de distribuer, en cas d'accident nucléaire, des comprimés contenant un isotope non radioactif de l'iode ; quel est l'intérêt de cette mesure ?

Chimie

Objectifs

- ▶ Justifier les différentes opérations réalisées lors du suivi de l'évolution temporelle d'un système ; exploiter les résultats expérimentaux.
- ▶ Définir l'équivalence lors d'un titrage et en déduire la quantité de matière de réactif titré.
- ▶ À partir de mesures expérimentales et du tableau descriptif de l'évolution du système, représenter, en fonction du temps, la variation des quantités de matière ou des concentrations d'un réactif ou d'un produit et de l'avancement de réaction.
- ▶ Savoir que la vitesse de réaction augmente en général avec la concentration des réactifs et avec la température.
- ▶ Interpréter qualitativement, à l'aide d'une des courbes d'évolution tracées, la variation de la vitesse de réaction.
- ▶ Connaître la définition du temps de demi-réaction $t_{1/2}$.
- ▶ Déterminer à l'aide de données expérimentales le temps de demi-réaction ; calculer $t_{1/2}$ à partir de résultats expérimentaux.
- ▶ Savoir utiliser, à une longueur d'onde donnée, la relation entre la concentration d'une espèce colorée, en solution, et l'absorbance.

A Réaction des ions iodure I^- sur l'eau oxygénée H_2O_2

Le suivi d'une transformation dans le temps ne peut être effectué que si cette transformation n'est ni trop rapide, ni trop lente, compte tenu de l'instrument utilisé.

L'eau oxygénée est utilisée sous forme de solution aqueuse. Elle est incolore et possède des propriétés antiseptiques. Généralement, c'est un oxydant puissant dont le réducteur conjugué est l'eau.

Activité 1 Écrire la demi-équation électronique du couple rédox en question (milieu acide).

L'eau oxygénée peut donc oxyder les ions iodure (incolores en solution aqueuse) en diiode (couleur brune en solution aqueuse).

Activité 2 Écrire l'équation de la réaction chimique entre l'eau oxygénée et I^- (milieu acide) en ajustant les nombres stœchiométriques.

La transformation subie par le système conduit à l'apparition d'une teinte progressivement jaune pâle, puis orangée et enfin brune. Cette coloration est due aux molécules de diiode en solution aqueuse (en réalité, le diiode étant peu soluble dans l'eau, on le dissout dans une solution d'iodure de potassium ; I_2 réagit alors avec les ions I^- du solvant pour former un complexe I_3^-).

B Détermination de la composition d'un système

Le suivi de la cinétique de cette réaction peut se faire par détermination, à différents instants, de la quantité (en mol.) de diiode formé.



Rappel de définition:

Doser une espèce chimique en solution, c'est déterminer sa concentration dans cette solution. Pour cela, on peut faire réagir cette espèce avec une autre espèce chimique (réactif titrant) selon une **réaction de dosage** (ou de titrage).

Cette réaction doit être unique, totale (les réactifs, s'ils ont été introduits dans les proportions stœchiométriques, sont intégralement consommés) et instantanée (temps de transformation très inférieur au temps de réponse de l'instrument de mesure).

On dit que l'on a atteint l'**équivalence** du dosage, lorsque les réactifs ont été mélangés dans les proportions stœchiométriques. Pour repérer visuellement l'équivalence, on utilise, généralement, une substance appelée **indicateur de fin de dosage**.

Le diiode peut donner lieu, avec les ions thiosulfate $S_2O_3^{2-}$, à une réaction chimique possédant les caractéristiques d'une réaction de dosage.

Activité 3 Écrire l'équation de la réaction chimique entre le diiode I_2 et les ions thiosulfate $S_2O_3^{2-}$ avec les nombres stœchiométriques corrects.

Couples rédox : I_2/I^- et $S_2O_3^{2-}/S_4O_6^{2-}$.

Activité 4 Donner la composition qualitative du système dans son état initial (avant toute transformation) : puis dans son état final (lorsque la transformation est terminée) dans le cas d'un mélange des réactifs dans les proportions stœchiométriques.

Parmi les différentes espèces chimiques intervenant ici, seul le diiode est coloré en solution aqueuse (brun).

L'équivalence du dosage est détectée avec précision par ajout dans le mélange réactionnel, d'empois d'amidon.

La solution subit une brusque décoloration (à la goutte près) lorsque l'on verse une solution de thio-sulfate dans une solution aqueuse de diiode.

Activité 5 *Quel rôle joue l'empois d'amidon ?*

Le tableau récapitulatif de cette réaction, faisant apparaître l'avancement x de la réaction donne :

Équation chimique		$I_2 + 2S_2O_3^{2-} \rightarrow 2I^- + S_4O_6^{2-}$			
État du système	Avancement	Quantités de matière (mol.)			
État initial	0	n_0	n'_0	0	0
En cours de transformation	x				
État final	x_{\max}				

Activité 6 a) Compléter le tableau ci-dessus en considérant l'état final du système correspondant à l'équivalence du dosage.

b) Trouver alors la relation entre quantités de matière de diiode et de thiosulfate, à l'équivalence.

La détermination de la quantité de matière de diiode formé à un instant donné se fait de la manière suivante :

- ▶ Mélanger rapidement, à un instant pris comme origine ($t = 0$) (on déclenche le chronomètre) : 50,0 mL d'eau oxygénée à $0,050 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ acidifiée par de l'acide sulfurique et 50,0 mL d'une solution d'iodure de potassium à $0,20 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Le mélange se colore progressivement (réaction lente) avec la formation du diiode.
- ▶ À une date t_1 donnée, prélever 10,0 mL de mélange à l'aide d'une pipette jaugée et les verser dans un bécher.
- ▶ Ajouter immédiatement un mélange d'eau (environ 20 mL) et de glace pilée.
- ▶ Doser le diiode formé dans le prélèvement (noté 1) par une solution titrée de thiosulfate de sodium de concentration $0,040 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ en présence d'un peu d'empois d'amidon.
- ▶ À une autre date t_2 , effectuer un 2^{ème} prélèvement de 10,0 mL, ajouter un peu d'eau et de glace et doser le diiode formé dans le prélèvement 2.

C Exploitation des résultats

Activité 7 *Pour quelle raison faut-il ajouter un mélange eau + glace avant de doser le diiode de chaque prélèvement ?*

On obtient les résultats consignés dans le tableau ci-après :

t : date du prélèvement par rapport à l'instant origine.

V : volume de solution de thiosulfate versé à l'équivalence.

n'_{I_2} (mol) : quantité (en mol) de diiode présent dans le prélèvement.

n_{I_2} (mol) : quantité (en mol) de diiode présent dans le mélange.

t (mn)	0	1	3	5	7	10	12	20	25	30	40
V (mL)	0	2,6	4,4	5,9	7,2	8,25	9,3	11,5	12	12,25	12,5
n'_{I_2} (mmol)											
n_{I_2} (mmol)											
X (mmol)											

Activité 8

- Calculer les quantités initiales de chacun des réactifs.
- Construire un tableau récapitulatif faisant apparaître l'avancement X de la réaction.
- Quel est le réactif limitant ?
- Compléter les deux dernières lignes du tableau.

La réaction entre les ions iodure et l'eau oxygénée est lente et totale : elle ne s'arrête que lorsque le réactif limitant a été entièrement consommé.

Activité 9

Tracer le graphe représentant les variations de l'avancement X de la réaction en fonction du temps t : $X = f(t)$? Retrouver la valeur de X_{max} calculée dans l'activité 8 sur le graphe.

Ce graphe montre l'évolution de l'avancement X en fonction du temps.

D Temps de demi-réaction

On appelle temps de demi-réaction $t_{1/2}$, la durée nécessaire pour que l'avancement X soit parvenu à la moitié de sa valeur finale.

L'un des intérêts de connaître cette valeur pour une réaction donnée est de pouvoir choisir une méthode de suivi de cinétique adaptée : si $t_{1/2}$ est de l'ordre de la minute ou plus, un suivi par voie chimique est possible (voir paragraphe 4), si la valeur de $t_{1/2}$ est inférieure à la seconde, il est préférable alors d'utiliser un appareil de mesure à faible temps de réponse : méthode physique (conductimètre, spectrophotomètre...)

Activité 10

- À partir du graphe : $X = f(t)$, déterminer la valeur du temps de demi-réaction de la réaction étudiée ici.
- La transformation est-elle achevée lorsque $t = 2 * t_{1/2}$?

A Définition

En mécanique, la vitesse moyenne d'un mobile, par rapport à un référentiel donné, est le quotient de la distance parcourue au cours du mouvement par la durée du déplacement : $\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$.

La vitesse instantanée d'un mobile en un point donné, est obtenue si l'on considère la durée de déplacement infiniment petite, soit : $v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt}$.

En Chimie, la vitesse de réaction v est définie de façon analogue par rapport à l'avancement x de réaction :

$$v = \frac{1}{V} \cdot \frac{dx}{dt}$$

avec x : avancement de réaction (mol) et V : volume de solution utilisée.

Remarques :

a) On parle de vitesse **volumique** de réaction car celle-ci est indépendante du volume de solution utilisée.

b) v s'exprime en $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{temps}^{-1}$, l'unité de temps pouvant être la seconde, la minute, l'heure ...

B Détermination graphique

La détermination de la valeur d'une vitesse de réaction à un instant t donné peut se faire à partir du graphe $x = f(t)$. La valeur de la vitesse de réaction, à un instant t donné, est proportionnelle au coefficient directeur de la tangente à la courbe $x = f(t)$ à la date t considérée.

- Activité 11**
- a) À partir du graphe $x = f(t)$ tracé précédemment, calculer la valeur de la vitesse de la réaction entre l'eau oxygénée et les ions iodure aux instants $t = 5 ; 10 ; 20 \text{ mn}$. Exprimer ces vitesses en $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{mn}^{-1}$.
- b) Quelle est l'évolution de cette vitesse au cours du temps ?
- c) Par une interprétation microscopique, justifier cette évolution.

A Spectre d'absorption en lumière visible

Lorsque de la lumière traverse une substance, elle est en partie **absorbée** par celle-ci, l'autre partie traverse la substance (elle est **transmise**).

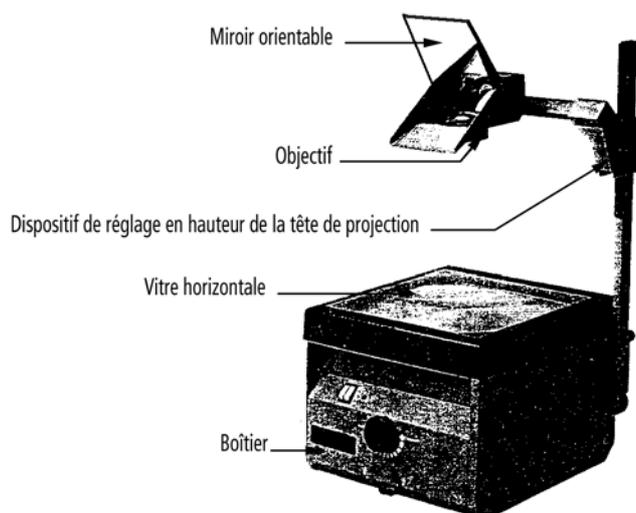
L'existence des spectres lumineux a été abordée en Physique, en classe de Seconde.

Les solutions aqueuses colorées donnent, en particulier, des **spectres d'absorption** (voir cours CNED Physique-Chimie Seconde Fascicule A page 71).

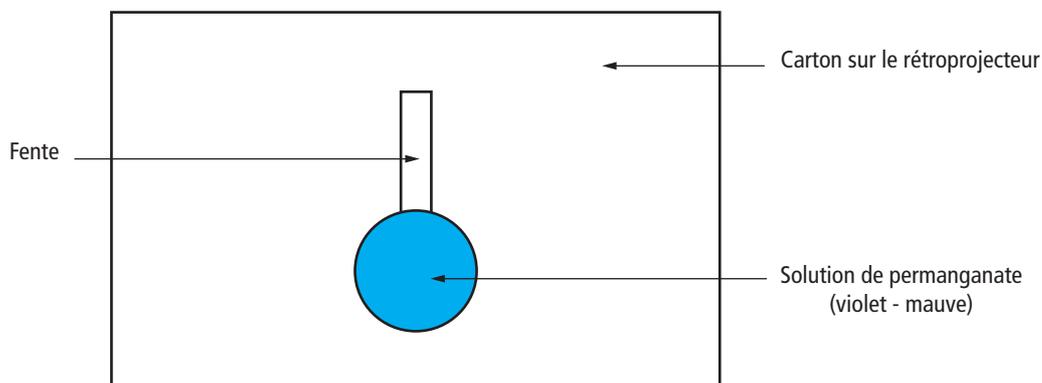
C'est le cas d'une solution aqueuse de permanganate de potassium KMnO_4 ; cette solution, placée à la lumière du jour, prend une couleur violet-mauve. Cela signifie que la solution est traversée par des radiations lumineuses qui, mélangées, donnent la couleur violet-mauve. Par contre, la solution a absorbé les radiations qui donnent la couleur complémentaire du violet-mauve : le vert.

Pour le vérifier, un dispositif expérimental consiste à utiliser un rétroprojecteur (source de lumière blanche).

Sur la lentille objectif du rétroprojecteur, on place un réseau (sorte de diapositive comportant un grand nombre de traits noirs, fins et parallèles (de l'ordre de 500 traits par mm)) qui a la propriété, comme le prisme, de décomposer la lumière polychromatique.



Sur la vitre horizontale éclairée du rétroprojecteur, on place un morceau de carton muni d'une fente fine. Une boîte de Pétri contenant la solution de permanganate à analyser est disposée sur la fente du montage :



Le spectre d'absorption de KMnO_4 apparaît sur l'écran placé devant le rétroprojecteur.

- Activité 12** a) Quel type de spectre obtient-on : un spectre continu ou un spectre de raies ?
 b) Comment évoluera l'allure du spectre vu sur l'écran si on remplace la solution de permanganate de potassium par des solutions de même nature mais de plus en plus concentrées en permanganate ?

L'absorption de lumière par une substance en solution augmente avec la concentration de cette substance.

L'absorption de lumière est quantifiée par une grandeur physique appelée **absorbance** et notée **A**. L'absorbance est une grandeur sans dimension (sans unité).

- Activité 13** Pour des solutions de même nature et de même concentration, quel autre facteur, relatif à la solution, peut faire varier A ?

B Relation entre absorbance et concentration d'une espèce colorée

L'espèce colorée choisie est le diiode I_2 en solution aqueuse. L'expérience consiste à mesurer l'absorbance A de plusieurs solutions-étalon de diiode de concentrations données.

Pour cela, il convient tout d'abord de réaliser le zéro d'absorbance (appelé aussi le blanc), c'est-à-dire régler la valeur de A sur 0 lorsque l'on place une cuve, contenant uniquement le solvant des solutions étudiées, dans le spectrophotomètre (afin de ne pas tenir compte de l'éventuelle absorbance du solvant).

Il suffit ensuite de régler la valeur de la longueur d'onde de la radiation lumineuse et la mesure des absorbances peut commencer.

Les résultats expérimentaux donnent :

$[I_2]$ (mol · L ⁻¹)	0	0,000 1	0,000 5	0,001 0	0,002 0	0,004 0	0,006 0	0,008 0
A	0	0,037	0,102	0,203	0,304	0,741	1,073	1,550

- Activité 14** a) Tracer le graphe représentant les variations de l'absorbance A en fonction de la concentration en diiode $[I_2]$.
 b) Par une méthode graphique, exprimer la relation liant l'absorbance A à la concentration en diiode.

Absorbance et concentrations sont donc 2 grandeurs proportionnelles.

On en déduit la relation entre absorbance et concentration pour une espèce colorée donnée :

$$A = k \cdot C$$

Avec k : constante de proportionnalité et C : concentration molaire (mol · L⁻¹)

k dépend de la nature de l'espèce absorbante, de la valeur de la longueur d'onde de la radiation utilisée ainsi que de l'épaisseur de solution traversée.

Cette relation permet, à partir de la mesure de l'absorbance d'une espèce colorée en solution, de déduire la concentration de cette espèce connaissant son absorbance.

C Conditions de validité de la relation

- ▶ La lumière utilisée par le spectrophotomètre doit être (quasi) monochromatique. Pour déterminer la valeur de λ , on cherche la longueur d'onde λ_{\max} pour laquelle l'absorption est maximale.
- ▶ La concentration de la solution doit être faible.
- ▶ La solution doit être limpide.

Le suivi de la cinétique d'une transformation consiste à déterminer l'avancement de la réaction associée. Il peut se faire par 2 voies ou méthodes :

► Méthode chimique :

C'est la méthode utilisée précédemment (paragraphe 2.1.2.) car la détermination de x est effectuée à l'aide d'une réaction chimique (réaction de dosage).

Cette méthode, qui nécessite une quantité importante de réactifs, ne fournit qu'un suivi discontinu de la transformation.

► Méthode physique :

Certaines grandeurs physiques peuvent dépendre de la concentration d'une ou plusieurs espèces du système (exemple de la conductivité en Classe de Première).

Ce peut être le cas, en particulier, lorsque l'espèce est colorée en solution : la lumière transmise nous permet de déterminer la concentration de l'espèce absorbante. Cette détermination peut être colorimétrique (échelle de teintes) ou spectrophotométrique.

On parle de méthode physique car le suivi est effectué par mesure d'une grandeur physique.

L'avantage de ces méthodes est de permettre des mesures rapides en continu, tout en ne nécessitant que de faibles quantités de réactifs (dans le cas de la spectrophotométrie : le contenu d'une cuve soit 2 mL environ).

Par la suite, la réaction chimique associée à la transformation du système étudié est la réaction entre l'eau oxygénée et les ions iodure.

A Par échelle de teintes

Une échelle de teintes (en diode) est constituée de plusieurs solutions-étalon de concentrations connues et placées dans des tubes à essais identiques, disposés par concentrations croissantes en diode sur un porte-tube.

La couleur de ces solutions varient du jaune pâle au brun foncé.

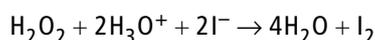
Dans un tube à essais, on verse de l'eau oxygénée acidifiée, à laquelle on ajoute une solution d'iodure de potassium (déclenchement du chronomètre). On agite le tube (identique aux tubes témoins) et on le place à côté de l'échelle de teintes.

On note la date t_1 à laquelle la couleur du mélange réactionnel s'identifie à celle de l'étalon n° 1 (jaune pâle), puis on note la date t_2 à laquelle la couleur du mélange s'identifie à celle de l'étalon n° 2 et ainsi de suite ...

Lorsque la transformation est terminée, on peut construire le tableau d'avancement de la réaction et tracer le graphe $x = (t)$ correspondant de manière à déterminer les vitesses de réaction désirées.

B Par spectrophotométrie

On étudie la cinétique de la réaction de décomposition de l'eau oxygénée H_2O_2 par les ions iodures I^- en présence d'acide sulfurique. L'équation-bilan de la réaction est telle que :



On suit cette réaction par spectrophotométrie : la méthode consiste à mesurer l'absorbance A (partie de l'énergie lumineuse absorbée par la solution colorée).

1) Conditions expérimentales

On place dans la cuve de mesure du spectrophotomètre un volume $V_0 = 1,0 \text{ mL}$ de solution d'eau oxygénée de concentration initiale $c_0 = 0,080 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

À l'instant $t = 0$, on ajoute un volume $V'_0 = 1,0 \text{ mL}$ de solution acidifiée d'iodure de potassium ($\text{K}^+ + \text{I}^-$) de concentration $c'_0 = 0,060 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

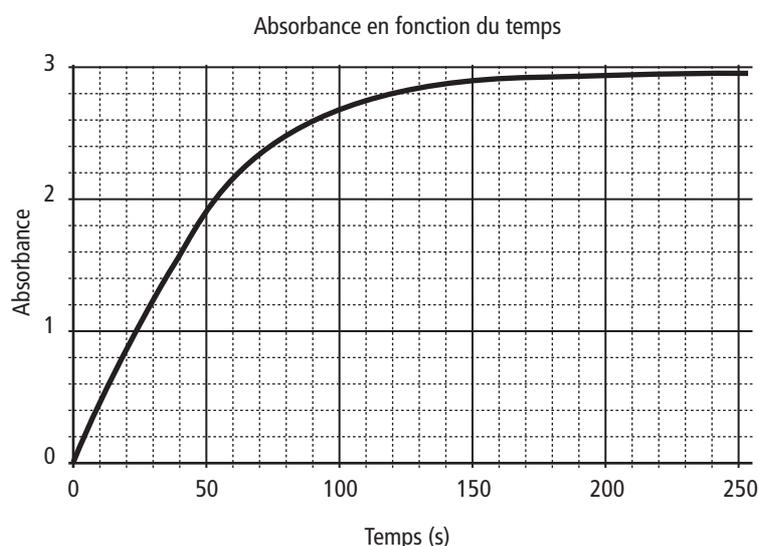
Activité 15

a) Quel est le réactif qui limite cette réaction ? Justifier votre réponse.

b) En considérant la réaction comme totale, calculer la valeur de la concentration en diiode en fin de réaction.

2) Étude cinétique

On lance la mesure de l'absorbance en fonction du temps en effectuant une mesure toutes les secondes. On obtient l'enregistrement reproduit ci-dessous :



Activité 16

a) Exprimer la vitesse de réaction à un instant t en fonction de l'absorbance.

b) Déterminer graphiquement la vitesse instantanée de formation de diiode à $t = 50 \text{ s}$.

c) Les vitesses instantanées de formation de diiode aux instants $t = 10 \text{ s}$ et $t = 150 \text{ s}$ ont pour valeurs respectives $V_{10} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ et $V_{150} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Comment évolue la formation du diiode au cours du temps ? Donner une explication à ce phénomène.

Résumé

On appelle temps de demi-réaction $t_{1/2}$, la durée nécessaire pour que l'avancement x soit parvenu à la moitié de sa valeur finale.

En Chimie, la vitesse de réaction v est la dérivée de l'avancement x de réaction par rapport au temps, que divise le volume de solution étudiée :

$$v = \frac{1}{V} \cdot \frac{dx}{dt}$$

avec X : avancement de réaction (mol) et V : volume de solution utilisée.

La détermination de la valeur d'une vitesse de réaction à un instant t donné peut se faire à partir du graphe $X = f(t)$.

La valeur de la vitesse de réaction à un instant t donné est proportionnelle au coefficient directeur de la tangente à la courbe $x = f(t)$ à la date t considérée.

L'absorbance d'une espèce colorée en solution est proportionnelle à sa concentration en solution :

$$A = k \cdot C$$

Avec k : constante de proportionnalité et C : concentration molaire ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$).

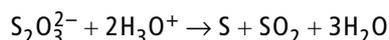
Le suivi d'une cinétique de réaction peut se faire par une méthode chimique (prélèvements successifs et titrages par exemple) ou par une méthode physique (par comparaison avec une échelle de teinte, par conductimétrie ou par spectrophotométrie ...)

Exercices

Exercice 1 Cinétique de la réaction de dismutation de l'ion thiosulfate

On verse $V_1 = 10$ mL d'une solution d'acide chlorhydrique de concentration $C_1 = 5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ dans $V_2 = 40$ mL d'une solution de thiosulfate de sodium de concentration $C_2 = 0,5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Le thiosulfate de sodium a pour formule $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$. Le mélange blanchit progressivement par formation de soufre solide.

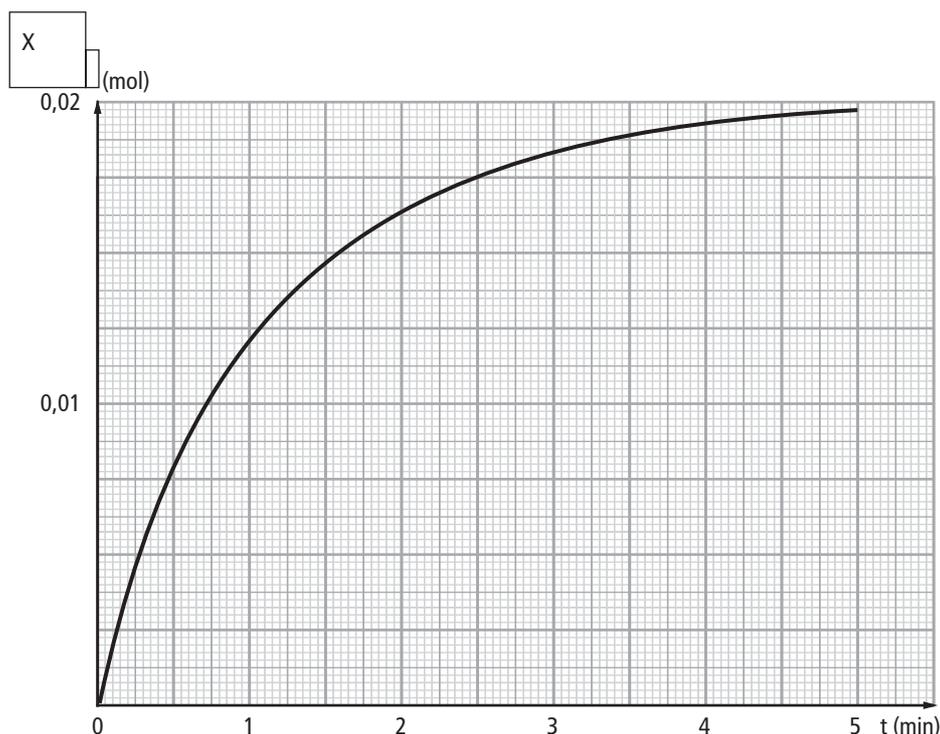
L'équation-bilan de la réaction s'écrit :



- 1 On suit la formation du soufre solide au cours du temps. On obtient la courbe ci-après où X désigne l'avancement de la réaction. Justifier la valeur de la limite atteinte par X.
- 2 Définir puis calculer la vitesse de réaction à la date $t_1 = 2$ min
- 3 On recommence l'expérience en changeant la concentration de l'acide qui vaut maintenant $C'_1 = 3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, les volumes V_1 , V_2 et la concentration C_2 restant inchangés.

La valeur limite calculée à la 1^{ère} question est-elle modifiée ? La vitesse de réaction est-elle modifiée ? Si oui, comment ?

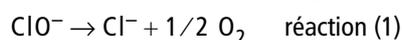
Cinétique de la réaction de dismutation de l'ion thiosulfate



Exercice 2 Vieillessement d'une eau de Javel

On se propose d'étudier la décomposition de l'eau de Javel.

L'eau de Javel se décompose lentement selon la réaction d'oxydoréduction suivante :



On utilise l'eau de Javel achetée en berlingot. Les indications du fabricant sont les suivantes :

- volume : 250 mL ;
- degré chlorométrique : 48° ;
- composition solution aqueuse d'hypochlorite de sodium ($\text{Na}^+ + \text{ClO}^-$) et de chlorure de sodium ;
- date de fabrication : juin 2002 ;
- à diluer dans les trois mois qui suivent la date de fabrication.

On dilue la solution commerciale afin d'obtenir une solution S_1 cinq fois moins concentrée.

❶ **Étude de la cinétique de la réaction (catalysée par les ions cobalt Co^{2+})**

Pour étudier la cinétique de la réaction (1) catalysée par les ions Co^{2+} , on utilise un volume $V_1 = 100$ mL de la solution S_1 .

On déclenche le chronomètre à l'instant où l'on met le catalyseur dans la solution. Pour suivre l'évolution de la réaction, on mesure à température et pression constantes le volume de dioxygène dégagé au cours du temps. On néglige la quantité de dioxygène dissoute dans l'eau par rapport à la quantité de dioxygène produite. Dans le tableau suivant, le volume de dioxygène dégagé V_{O_2} est déterminé dans des conditions de température et de pression telles que volume molaire est : $V_M = 22,4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$.

t (s)	0	30	60	90	120	150	180	210	240
V_{O_2} (mL)	0	42	74	106	138	163	189	212	231
$[\text{ClO}^-]$ ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)		0,22	0,19	0,16	0,14	0,11	0,090	0,070	0,056

t (s)	270	300	330	360	390	420	450	∞
V_{O_2} (mL)	246	255	269	278	286	291	295	295
$[\text{ClO}^-]$ ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	0,043	0,035	0,023		0,008	0,003 5	0	0

a) À partir de la mesure de $V_{\text{O}_2}(\infty)$, déterminer la concentration en ion hypochlorite $[\text{ClO}^-]_0$ à $t = 0$ dans la solution S_1 .

b) Établir l'expression littérale de la concentration en ions hypochlorite notée $[\text{ClO}^-]$ dans la solution S_1 à chaque date t en fonction de $[\text{ClO}^-]_0$, $V_{\text{O}_2}(t)$, V_1 et V_M . Calculer $[\text{ClO}^-]$ à $t = 360$ s.

c) Calculer la valeur de l'avancement x de la réaction aux différentes dates du tableau ci-dessus.

d) Représenter la courbe $x = f(t)$ sur une feuille de papier millimétré. Échelles : en abscisses : 1 cm représente 30 s.

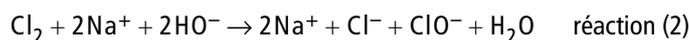
En ordonnées : 1 cm représente $2,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

e) Calculer la vitesse de réaction à la date $t = 240$ s.

❷ **Vieillessement de l'eau de Javel**

Le degré chlorométrique français correspond au volume en litres de dichlore gazeux dans des conditions de température et de pression telles que $V_{\text{mol}} = 22,4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$ utilisé lors de la préparation d'un litre d'eau de Javel.

L'équation-bilan de la réaction chimique de préparation de l'eau de Javel est :



Déterminer la concentration des ions hypochlorite dans le berlingot : à la date de fabrication, à la date de l'expérience. Conclure.

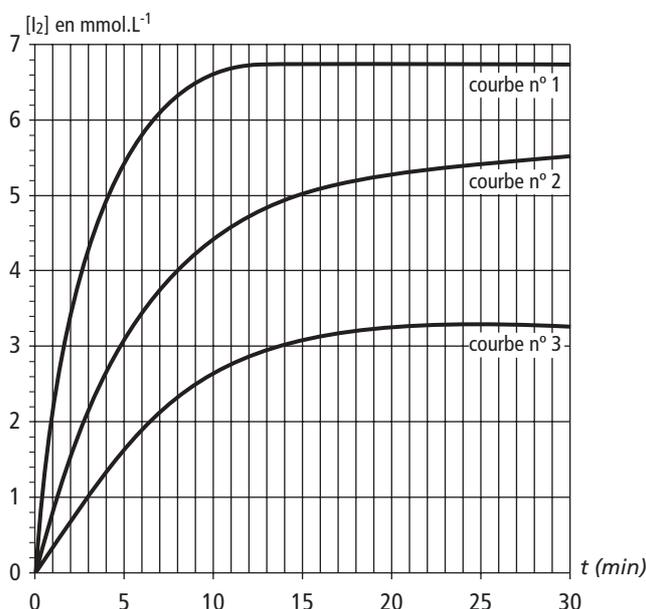
Exercice 3 Étude cinétique de la réaction de l'eau oxygénée avec les ions iodure

On veut étudier la cinétique d'une réaction lente entre les ions iodure I^- et le peroxyde d'hydrogène (eau oxygénée) H_2O_2 . La concentration de diiode formé est déterminée par spectrophotométrie.

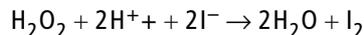
On réalise successivement les trois mélanges ci-dessous (pour chacun des mélanges, l'eau oxygénée est introduite à la date $t = 0$ s) ; dans les trois mélanges, l'acide sulfurique est en large excès.

	Acide sulfurique $1,0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	Solution KI $0,10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	Eau oxygénée $0,10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	Eau distillée
Mélange A	10,0 mL	18,0 mL	2,0 mL	0
Mélange B	10,0 mL	10,0 mL	2,0 mL	8,0 mL
Mélange C	10,0 mL	10,0 mL	1,0 mL	9,0 mL

Le document ci-après donne les concentrations en diiode formé en millimole par litre en fonction du temps.



L'équation de la réaction étudiée est :



1 Étude de l'état initial

- Calculer, en millimole, les quantités initiales en peroxyde d'hydrogène et en ion iodure, dans chaque cas.
- Préciser, pour chaque mélange, le réactif limitant.

2 Étude des courbes figurant sur le document

- Calculer, pour chaque mélange, les concentrations finales en diiode lorsque la réaction est terminée.
- Attribuer à chaque courbe numérotée le mélange correspondant A, B ou C en justifiant.
- À $t = 30 \text{ min}$, les réactions sont-elles terminées dans les trois cas ? Justifier la réponse.

3 Détermination de vitesses de réaction

- Calculer pour la courbe n° 2 la vitesse de réaction, en $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, lorsque $t = 5 \text{ min}$ puis lorsque $t = 15 \text{ min}$ (préciser sur le document, la méthode graphique utilisée).
- Indiquer le facteur cinétique responsable de cette variation de vitesse au cours du temps.

Exercice 4 Suivi spectrophotométrique d'une réaction

L'énergie lumineuse absorbée par une espèce colorée dépend de la longueur d'onde utilisée.

Un spectrophotomètre, une fois réglé, donne une mesure de cette absorption par l'intermédiaire d'une grandeur numérique sans dimension : l'absorbance A . En général, l'absorbance est proportionnelle à la concentration molaire de l'absorbant $A = k \cdot C$.

Un technicien veut suivre au spectrophotomètre la réaction en milieu acide entre les ions MnO_4^{2-} (qui donnent à la solution une couleur violette) et les molécules (incolores) d'acide oxalique $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$.

Première étape

1 Il place dans le spectrophotomètre une cuve contenant 1,0 mL de permanganate de potassium à $2,0 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 0,5 mL d'acide sulfurique à $0,5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et 1,0 mL d'eau.

Cette cuve est traversée par un faisceau lumineux adéquat. L'appareil délivre la courbe (a) de la figure ci-après représentative des valeurs d'absorbance au cours du temps.

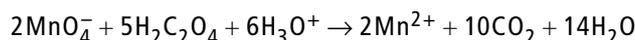
a) Quelle est l'espèce concernée par cette mesure ?

b) Montrer que le coefficient k correspondant à cette espèce vaut $2,2 \cdot 10^{-3} \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Deuxième étape

2 Il remplace la cuve par une autre contenant 1,0 mL de permanganate à $2,0 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 0,5 mL d'acide sulfurique à $0,50 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et il rajoute 1,0 mL d'une solution d'acide oxalique à $5,0 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ à la date $t = 0$.

L'appareil trace alors la courbe (b) de la figure, représentative de l'évolution de la réaction totale d'équation :



Quelle est l'espèce concernée par cette mesure ? Quelle information donne le graphe (b) sur cette espèce ?

3 Le spectrophotomètre calcule aussi la dérivée de l'absorbance A et la grandeur Y définie par :

$$Y = -100 \cdot \frac{dA}{dt}$$

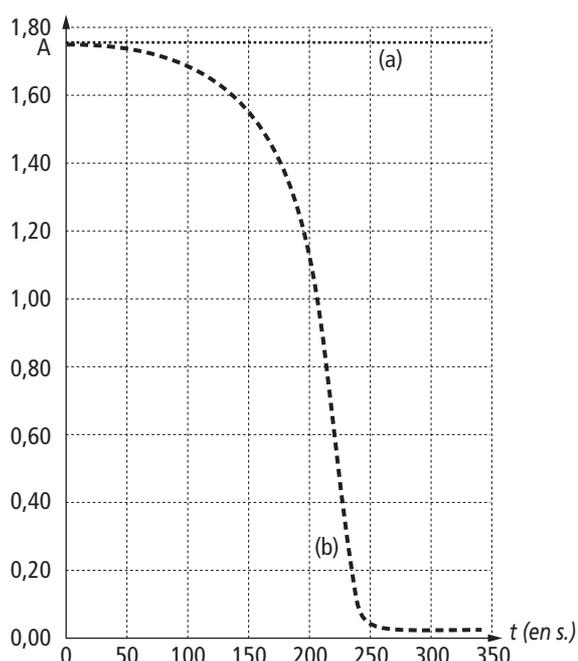
Les valeurs de Y, exprimées en min^{-1} , sont portées dans le tableau incomplet ci-dessous :

t (s)	100	130	150	170	190	195	200	205	210	220	230	247	257
y (mn^{-1})	9,7	13,4		37,4	53,9	63,0	75,0	84,6	101,2	158,3	253,0	35,0	2,0

a) Expliquer comment on peut évaluer numériquement Y à une date donnée à partir de la courbe (b) de la figure ; compléter la case vide du tableau.

b) Sachant que l'expression de la vitesse de la réaction est : $v = -\frac{1}{2} \cdot \frac{d[\text{MnO}_4^-]}{dt}$, exprimer v en fonction de la grandeur Y.

c) Au vu de ce tableau, dire comment évolue la vitesse v au cours du temps.



Séquence

3

> **Physique :**

Énergie nucléaire

> **Chimie :**

**Mise en évidence
de la notion d'équilibre
chimique**

Sommaire

Séquence 3

Physique > Énergie nucléaire

Chapitre 1	>	La relation d'Einstein	83
Chapitre 2	>	Cohésion du noyau	84
		A Energie de liaison	
		B Unités usuelles en physique nucléaire	
		C Energie de liaison par nucléon	
Chapitre 3	>	Énergie libérée dans une réaction nucléaire	86
		A Lois de conservation en physique	
		B Energie libérée lors d'une désintégration radioactive	
		C Courbe d'Aston	
Chapitre 4	>	Fission nucléaire	89
		A Fission de l'uranium 235	
		B Bilan énergétique	
Chapitre 5	>	Fusion nucléaire	90
	>	Résumé	91
	>	Exercices	92

Chimie > Mise en évidence de la notion d'équilibre chimique

Chapitre 1	>	Réactions acido-basiques (Rappels de classe de 1^{ère})	99
		A Acide et base	
		B Couples acide-base	
Chapitre 2	>	Définitions et mesure du pH	101
		A Définition du pH	
		B Mesure du pH	
Chapitre 3	>	Notion d'équilibre chimique	103
		A Réactions totales et réactions non totale	
		B Equilibre chimique	
Chapitre 4	>	Interprétation de la notion d'équilibre chimique	106
	>	Résumé	107
	>	Exercices	108

Physique

Objectifs

- ▶ Connaître la relation d'Einstein entre masse et énergie
- ▶ Savoir calculer l'énergie de liaison d'un noyau et l'énergie de liaison par nucléon
- ▶ Connaître les lois de conservation de la charge électrique, du nombre de nucléons et de l'énergie
- ▶ Savoir interpréter la courbe d'Aston
- ▶ Savoir calculer l'énergie libérée par une réaction nucléaire
- ▶ Connaître des exemples illustrant la libération d'énergie par réaction nucléaire

Les physiciens du début du siècle constataient la très grande valeur de l'énergie libérée dans les réactions nucléaires ; lors des désintégrations radioactives étudiées, cette énergie libérée se retrouvait sous forme d'énergie cinétique des particules qui étaient émises à très grande vitesse ainsi que dans le rayonnement γ qui accompagnait souvent ces réactions.

Mais ces mêmes physiciens butaient sur la question : « D'où les noyaux peuvent-ils tirer cette formidable énergie qu'ils libèrent en se désintégrant ? »

En bâtissant sa théorie de la relativité, Einstein apporta la réponse à cette question : masse et énergie ne sont en fait que deux manifestations apparemment différentes de la même grandeur.

Ainsi, lorsqu'un système libère de l'énergie, sa masse diminue et lorsqu'il absorbe de l'énergie, sa masse augmente.

Des mesures très précises ont confirmé que la libération d'énergie par les noyaux s'accompagnait d'une petite diminution de leur masse. L'équivalence entre masse et énergie s'étend à tous les phénomènes et pas seulement aux réactions nucléaires, mais la quantité d'énergie libérée par les réactions chimiques est trop faible pour qu'on puisse mettre en évidence la perte de masse (voir exercice 1).

Masse et énergie, étant la manifestation d'une même grandeur, pourraient s'exprimer dans la même unité, mais l'utilisation du système S.I. d'unités où la masse s'exprime en kilogramme et l'énergie en joule impose l'existence d'une relation de conversion de la masse (en kg) en énergie (en J).

Cette relation est appelée relation d'Einstein :

$$E = mc^2$$

Le facteur de conversion entre l'énergie et la masse est le carré de la célérité de la lumière dans le vide.

Comme celle-ci vaut : $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, on comprend qu'à une faible diminution de la masse exprimée en kg correspond une très grande valeur de l'énergie exprimée en J.

Activité 1 *Même dans les réactions nucléaires, il n'y a qu'une petite fraction de la masse qui se trouve libérée sous forme d'énergie. Imaginons toutefois que l'on sache transformer totalement la masse en énergie.*

Quelle énergie, exprimée en unité S.I., obtiendrait-on avec 1 kg de matière ?

À quelle durée de fonctionnement d'une centrale électrique de 1 000 MW (soit 10^9 W) correspond une telle énergie ?

A Énergie de liaison

Considérons un ensemble de Z protons et de N neutrons immobiles et extrêmement éloignés les uns des autres. La seule énergie E que possède ce système tient à la masse des particules qu'il contient :

$E = Zm_p c^2 + Nm_n c^2$ en notant m_p la masse du proton et m_n la masse du neutron. Jusqu'ici, nous avons considéré que la masse du proton était égale à la masse du neutron, mais les calculs que nous allons aborder maintenant exigent une plus grande précision et nous distinguerons ces deux masses.

Supposons maintenant que ces Z protons et ces N neutrons soient associés pour former un noyau de masse m_0 , l'énergie de masse de ce noyau vaut $E_0 = m_0 c^2$. Cette énergie E_0 est toujours inférieure à celle de l'énergie E des Z protons et des N neutrons séparés.

On appelle **énergie de liaison E_ℓ du noyau la différence : $E_\ell = E - E_0$.**

L'énergie de liaison représente l'énergie qu'il faut fournir au noyau pour le briser en nucléons indépendants tous très éloignés les uns des autres (figure 1).

En remplaçant E et E_0 par leur valeur, on obtient :

$$E_\ell = (Zm_p + Nm_n - m_0)c^2.$$

On écrit souvent cette relation sous la forme : $E_\ell = \delta m c^2$, dans laquelle δm , qui est appelé défaut de masse, représente la différence entre la masse des nucléons séparés et la masse du noyau :

$$\delta m = Zm_p + Nm_n - m_0.$$

L'énergie de liaison et le défaut de masse sont toujours positifs.

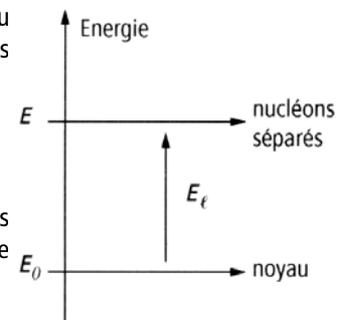


Figure 1

B Unités usuelles en physique nucléaires

Comme le kilogramme et le Joule sont d'un emploi peu pratique en physique nucléaire (elles sont adaptées pour l'étude de phénomènes macroscopiques à notre échelle), on exprime plus couramment, en physique nucléaire, les masses en unité de masse atomique (abréviation u) et les énergies en Mégaélectronvolt (abréviation : 1 MeV).

Comme la relation d'Einstein : $E = mc^2$ avec $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ne peut être utilisée qu'en unité S.I., il importe de savoir convertir des valeurs exprimées dans ces différentes unités.

Ainsi, $1 u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ (c'est par définition $\frac{1}{12}$ de la masse d'un atome de carbone du nucléide $^{12}_6\text{C}$, cette relation de conversion entre unité de masse atomique et kilogramme n'a pas à être connue, elle est rappelée dans les problèmes).

Quant à l'électronvolt, il a pour valeur : $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, d'où l'on déduit $1 \text{ MeV} = 1,60 \cdot 10^{-13} \text{ J}$.

Attention : cette relation de conversion n'est pas toujours donnée : certains énoncés indiquent simplement : « charge élémentaire : $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ » ou « charge de l'électron = $-1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ » et il importe alors de savoir que cette valeur numérique permet la conversion d'électronvolt en joule.

Comme l'énergie $E = mc^2$ d'une particule ou d'un ensemble de particules peut être exprimée en MeV, on exprime parfois la masse de la particule ou de l'ensemble de particules en MeV/c^2 (on lit tout simplement « MeV sur c deux »).

Ceci n'est qu'une facilité d'écriture : ainsi écrire : la masse du proton vaut $938,3 \text{ MeV}/c^2$ signifie en fait que l'énergie de masse du proton vaut $E = 938,3 \text{ MeV}$ soit :

$$E = 938,3 \times 1,60 \cdot 10^{-13} = 1,50 \cdot 10^{-10} \text{ J}$$

ce qui correspond à une masse $m_p = \frac{E}{c^2} = \frac{1,50 \cdot 10^{-10}}{(3,00 \cdot 10^8)^2} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

Remarque ► L'obtention de résultats plus précis nécessiterait d'utiliser une valeur plus précise pour la célérité de la lumière dans le vide.

Activité 2 Connaissant les masses du proton : $m_p = 1,007 3 \text{ u}$, du neutron : $m_n = 1,008 7 \text{ u}$, de l'hydrogène 3 (ou tritium) : $m_0 = 3,016 5 \text{ u}$, calculer le défaut de masse dans ce noyau (en u puis en kg) et l'énergie de liaison du noyau d'hydrogène 3 (en MeV).

C Énergie de liaison par nucléon

Connaissant l'énergie de liaison E_ℓ d'un noyau du nucléide A_ZX qui possède A nucléons, on obtient l'énergie de liaison par nucléon en calculant le quotient $\frac{E_\ell}{A}$.

L'énergie de liaison par nucléon s'exprime en MeV/nucléon, elle représente l'énergie moyenne qu'il faudrait apporter à chaque nucléon pour le sortir du noyau.

Plus l'énergie de liaison par nucléon est grande, plus il est difficile d'extraire les nucléons du noyau et donc, plus le noyau est stable.

Activité 3 Le défaut de masse du noyau de lithium 7 ; ${}^7_3\text{Li}$ vaut $\delta m = 0,040 4 \text{ u}$.

Calculer l'énergie de liaison par nucléon dans ce noyau (en MeV par nucléon).

Données : $1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$.

A Lois de conservation en physique

On appelle loi de conservation une loi physique imposant qu'une grandeur donnée conserve la même valeur avant une transformation et à la fin de cette transformation.

Nous avons déjà utilisé (sans le dire expressément) deux lois de conservation dans le chapitre précédent :

► la loi de conservation de la charge électrique : elle impose en particulier que le nombre de charge d'un noyau avant désintégration radioactive soit égal au total des nombres de charge du noyau fils et de celui de la particule émise.

► la loi de conservation du nombre de nucléons : elle impose que le nombre de nucléons (nombre de masse) d'un noyau avant désintégration radioactive soit égal au nombre total de nucléons contenus dans le noyau fils et dans la particule émise.

► Nous utiliserons aussi dans ce chapitre la loi de conservation de l'énergie : elle impose que l'énergie totale à l'issue d'une réaction nucléaire soit égale à l'énergie totale avant cette réaction.

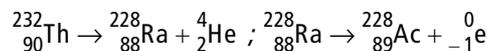
Or, l'énergie de masse contenue dans les noyaux à l'issue d'une réaction est généralement inférieure à l'énergie de masse contenue dans les noyaux avant la réaction. La loi de conservation de l'énergie permet d'affirmer qu'il y a à la fin de la réaction, de l'énergie autre que l'énergie de masse des noyaux.

Cette énergie peut être de l'énergie cinétique emportée par les noyaux, mais ce peut être aussi de l'énergie emportée par le rayonnement γ .

Remarque ① Les physiciens sont tellement sûrs de la validité de cette loi de conservation de l'énergie qu'en constatant un petit manque d'énergie à l'issue d'une désintégration β^- , ils ont supposé l'existence d'une particule nouvelle : le neutrino. Comme cette particule a une charge nulle et une masse extrêmement faible sinon nulle, elle a été très difficile à mettre en évidence. Au niveau d'un cours de terminale, il suffit de savoir que le neutrino existe et qu'il emporte un peu d'énergie lors d'une désintégration β^- (et de même lors d'une désintégration β^+).

② Une autre loi de conservation importante (mais qui ne figure pas au programme de terminale) est la conservation vectorielle de la quantité de mouvement.

Activité 4 Vérifier la conservation de la charge électrique et la conservation du nombre de nucléons lors des deux réactions de désintégrations radioactives ci-dessous :



B Énergie libérée lors d'une désintégration radioactive

La conservation de l'énergie lors d'une réaction de désintégration radioactive s'écrit :

Énergie de masse du noyau père (initialement immobile) = Énergie de masse du noyau fils et de la particule émise + énergie libérée.

L'énergie libérée se retrouve sous forme d'énergie cinétique de la particule émise, d'énergie cinétique du noyau fils (toujours beaucoup plus faible) et, éventuellement, d'énergie emportée par le rayonnement γ (nous négligeons l'énergie emportée par les neutrinos).

Activité 5 Connaissant l'énergie de masse de l'américium 241 : 224 495,8 MeV, du neptunium 237 : 220 762,8 MeV et du noyau d'hélium : 3 727,4 MeV, calculer l'énergie libérée par la réaction de désintégration α de l'américium 241 après avoir écrit l'équation de cette désintégration.

C Courbe d'Aston

Nous avons vu, à la fin du paragraphe 2.3, que les noyaux les plus stables sont ceux dans lesquels l'énergie de liaison par nucléon $\frac{E_\ell}{A}$ est la plus grande.

Si nous représentons sur un diagramme, l'énergie de liaison par nucléon en fonction du nombre A du nucléons, les noyaux les plus stables seraient ceux dont l'ordonnée est la plus grande.

En fait, l'habitude est prise de représenter l'opposé de l'énergie de liaison par nucléon : $-\frac{E_\ell}{A}$ en fonction du nombre A du nucléons : la courbe obtenue, dont l'allure est représentée sur la figure 2, est appelée courbe d'Aston.

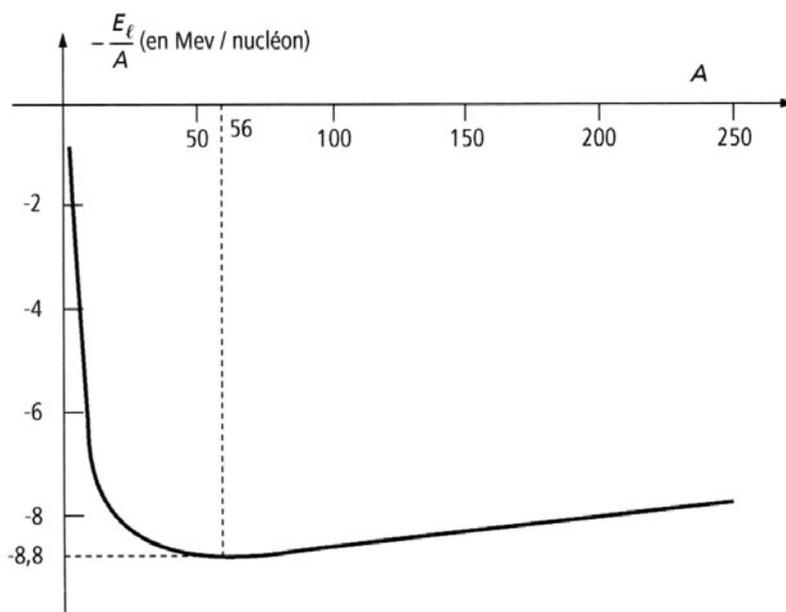


Figure 2

Bien entendu, seules les valeurs entières de l'abscisse représentent des noyaux (il n'existe pas de noyaux contenant des fractions de nucléons !). Par ailleurs, la courbe réelle (qu'il faudrait aller voir dans un manuel) n'a pas exactement cette régularité.

Mais le point important est celui-ci : les noyaux les plus stables sont ceux dont l'ordonnée est la plus faible (du fait de l'intervention du signe moins), donc ceux qui se situent « au fond de la cuvette ». Il s'agit des noyaux dont le nombre de masse est voisin de 56 (fer, cuivre, cobalt ...) mais comme le fond de la « cuvette » est relativement plat, il suffit de retenir que les noyaux les plus stables sont ceux dont le nombre de masse n'est ni trop grand ni trop petit.

À partir de la courbe d'Aston, on peut prévoir deux grands types de réactions nucléaires susceptibles de fournir de l'énergie (figure 3) :

– Si un noyau très lourd se scinde en deux noyaux plus légers de tailles comparables, ces deux noyaux seront situés plus près du fond de la « cuvette » que le noyau initial ce qui signifie que l'énergie de liaison par nucléon va augmenter.

Comme l'énergie de liaison par nucléon représente une énergie perdue par chaque nucléon, dire qu'elle augmente signifie que les nucléons vont perdre de l'énergie. Cette diminution de l'énergie de liaison par nucléon multipliée par le nombre de nucléons représente l'énergie libérée par la fission.

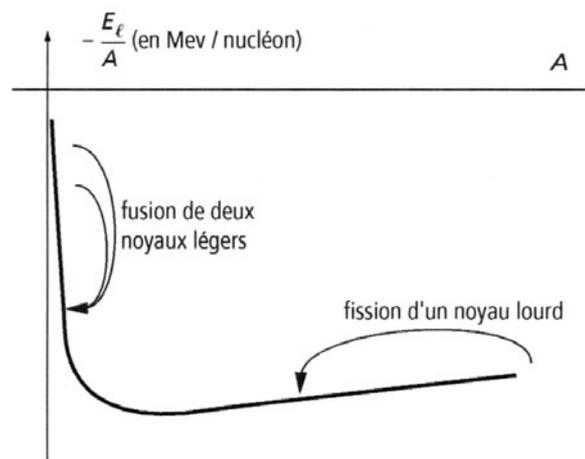


Figure 3

– Si deux noyaux très légers fusionnent pour former un noyau plus lourd, ce noyau plus lourd sera situé plus près du fond de la cuvette. Comme précédemment, la diminution de l'énergie de liaison par nucléon multipliée par le nombre de nucléons représente l'énergie libérée par la fusion.

Activité 6

Y aurait-il libération d'énergie au cours d'une réaction où un noyau de fer ${}_{26}^{56}\text{Fe}$ se briserait en deux noyaux identiques ?

A Fission de l'uranium 235

La fission de l'uranium 235 est la coupure de ce noyau en deux noyaux de taille comparable. Cette réaction est provoquée par l'impact d'un neutron sur le noyau d'uranium 235. On appelle noyaux fissiles les noyaux qui donnent une réaction de fission sous l'impact d'un neutron. Il existe d'autres noyaux fissiles que l'uranium 235 (notamment les noyaux de plutonium 239 et 241) mais nous limiterons notre étude à celui-là. Outre les deux noyaux résultant de la coupure en deux du noyau initial d'uranium 235, la réaction produit aussi quelques électrons qui sont éjectés à grande vitesse, des neutrons (2 ou 3) ainsi qu'un intense rayonnement γ .

L'important est que la réaction, en produisant plusieurs neutrons, va se poursuivre : ces neutrons vont, à leur tour, provoquer la fission d'autres noyaux d'uranium 235 qui vont produire des neutrons

On obtient ainsi une réaction en chaîne.

Dans les bombes atomiques à fission (bombes A), on laisse cette réaction s'emballer et en très peu de temps, tout l'uranium va subir la réaction de fission, l'énorme dégagement d'énergie qui en résulte provoque alors tous les dégâts que l'on connaît. À la suite de l'explosion, les noyaux obtenus, qui sont radioactifs, contaminent le territoire bombardé pendant de très longues durées et provoquent des maladies dans la population des dizaines d'années après l'impact.

Dans les centrales nucléaires, au contraire, le nombre de neutrons est régulé par des matériaux ayant la capacité de les absorber, de façon à maîtriser constamment l'énergie produite, utilisée pour faire bouillir de l'eau destinée à faire tourner une turbine.

Après utilisation, les barreaux d'uranium 235 contiennent de nombreux déchets radioactifs (les noyaux obtenus à l'issue de la fission), ils peuvent être retraités pour en retirer l'uranium 235 qui n'a pas réagi, mais de toute façon, ces déchets doivent finalement être stockés de façon à éviter toute contamination radioactive et ce problème du stockage des déchets est l'une des difficultés importantes rencontrées dans l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire.

B Bilan énergétique

L'énergie libérée par une réaction nucléaire est la différence entre l'énergie de masse totale avant la réaction (celle du noyau d'uranium 235 plus celle du neutron provoquant la fission) et l'énergie de masse totale après réaction (celle des noyaux plus celle des neutrons et électrons émis).

On trouve en moyenne une énergie libérée de 200 MeV par réaction de fission.

Ceci signifie qu'un gramme d'uranium peut libérer une énergie d'environ $8 \cdot 10^{10}$ J alors qu'il faut brûler près de deux tonnes de pétrole pour obtenir ce même résultat.

Activité 7 *En recherchant par vous même dans le cours les données qui peuvent vous être utiles, vérifiez la valeur $8 \cdot 10^{10}$ J qui correspond à l'énergie libérée par la fission d'un gramme d'uranium 235.*

Les réactions de fusion dégagent énormément d'énergie : environ quatre fois plus que les réactions de fission pour une même valeur de la masse initiale.

Ces réactions sont à l'origine de l'énergie produite par les étoiles comme le Soleil grâce à la fusion de l'hydrogène (voir exercice XX).

Malheureusement, cette énergie est difficile à domestiquer car il faut provoquer le contact entre deux noyaux qui ont tendance à se repousser puisqu'ils sont tous deux chargés positivement.

Ils ne peuvent approcher assez près l'un de l'autre pour enclencher la réaction de fusion que s'ils vont très vite, c'est-à-dire s'ils sont dans un milieu extrêmement chaud (de l'ordre de cent millions de degrés).

Dans les armes thermonucléaires (bombes H), cette température est atteinte par l'explosion d'une bombe à fission qui élève assez la température pour enclencher la réaction de fusion entre l'hydrogène 2 (deutérium) et l'hydrogène 3 (tritium).

Les recherches se poursuivent pour tenter de maintenir un plasma (gaz ionisé) suffisamment longtemps à une température assez élevée pour que s'amorcent la réaction de fusion.

Notons pour terminer que l'énergie géothermique (utilisation de la chaleur des nappes d'eau souterraines chauffées par les réactions radioactives ayant lieu dans le sol) et l'énergie solaire (due aux réactions de fusion dans le soleil) sont initialement de l'énergie nucléaire.

Résumé

► La valeur, en joule, de l'énergie obtenue par transformation d'une masse m , exprimée en kg, est donnée par la formule d'Einstein : $E = mc^2$ avec $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

► On appelle énergie de liaison E_ℓ du noyau la différence : $E_\ell = E - E_0$ en notant $E = Zm_p c^2 + Nm_n c^2$ l'énergie de masse des Z protons et N neutrons séparés et en notant $E_0 = m_0 c^2$ l'énergie de masse de ces nucléons assemblés pour former un noyau de masse m_0 .

Cette relation de définition de l'énergie de liaison peut aussi s'écrire sous la forme : $E_\ell = \delta m c^2$, en notant δm le défaut de masse : $\delta m = Zm_p + Nm_n - m_0$.

► En physique des particules, l'énergie est souvent exprimée en électronvolt $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, ou en méga-électronvolt : $1 \text{ MeV} = 1,60 \cdot 10^{-13} \text{ J}$.

► Connaissant l'énergie de liaison E_ℓ d'un noyau du nucléide ${}^A_Z X$ qui possède A nucléons, on obtient l'énergie de liaison par nucléon en calculant le quotient $\frac{E_\ell}{A}$, elle s'exprime en MeV/nucléon.

► On appelle loi de conservation une loi physique imposant qu'une grandeur donnée conserve la même valeur avant une transformation et à la fin de cette transformation.

Pour écrire une réaction nucléaire, on utilise la loi de conservation de la charge électrique et la loi de conservation du nombre de nucléons.

Pour calculer l'énergie libérée par la réaction, on utilise la loi de conservation de l'énergie : elle impose que l'énergie totale à l'issue d'une réaction nucléaire soit égale à l'énergie totale avant cette réaction.

► La courbe d'Aston est obtenue en portant en abscisse le nombre de nucléons de chaque noyau et en ordonnée l'opposé de l'énergie de liaison par nucléon : $-\frac{E_\ell}{A}$. Sur cette courbe, les noyaux les plus stables se situent « au fond de la cuvette ».

► Réaction de fission : un noyau très lourd se scinde en deux noyaux plus légers de tailles comparables. Ainsi, l'uranium 235 est fissile et la réaction, en produisant plusieurs neutrons, va se poursuivre : il s'agit d'une réaction en chaîne. Les noyaux obtenus par cette fission constituent les déchets radioactifs des centrales nucléaires.

► Réaction de fusion : deux noyaux très légers fusionnent pour former un noyau plus lourd.

Ces réactions sont à l'origine de l'énergie produite par les étoiles comme le Soleil grâce à la fusion de l'hydrogène.

E

xercices

Ces exercices doivent être résolus avec l'aide d'un tableau périodique des éléments, les valeurs numériques utiles à la résolution sont à rechercher dans le cours.

▄▄▄▄ **Connaître la relation d'Einstein entre masse et énergie**

Exercice 1 Einstein et Lavoisier

Équation de la réaction de combustion du dihydrogène dans le dioxygène : $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$.

La combustion de 2 moles de dihydrogène avec une mole de dioxygène fournit 2 moles d'eau.

Lavoisier concluait qu'il y avait conservation de la masse : 4 g de dihydrogène brûlant dans 32 g de dioxygène pour donner 36 g d'eau. Mais cette réaction est explosive et libère une énergie de 500 kJ (pour la combustion des 4 g de dihydrogène).

- 1 Cette réaction est-elle une réaction chimique ou une réaction nucléaire ? Expliquer.
- 2 Connaissant la valeur de l'énergie libérée par cette réaction, calculer la perte de masse en utilisant la relation d'Einstein.

La loi de Lavoisier (selon laquelle la masse des produits obtenus à l'issue d'une réaction chimique est égale à la masse des réactifs initiaux) est-elle remise en cause ?

Exercice 2 Énergie et radioactivité

Lors de la désintégration α du radium 226 : ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ donnant un noyau de radon, on constate que la masse en fin de réaction diminue de 0,002 3 % par rapport à la masse initiale.

- 1 Calculer, en J, l'énergie libérée par la désintégration radioactive complète d'un nanogramme de radium 226.
- 2 Sachant que la masse d'un atome de radium vaut $3,8 \cdot 10^{-25}$ kg, calculer, en MeV, l'énergie libérée lors de la désintégration radioactive d'un noyau de radium 226.
- 3 Sous quelle forme se retrouve l'énergie ainsi libérée ?

▄▄▄▄ **Savoir calculer l'énergie de liaison d'un noyau et l'énergie de liaison par nucléon**

Exercice 3 Énergie de liaison d'un noyau d'or 197

Calculer, en MeV, l'énergie de liaison du noyau d'or 197 : $({}^{197}_{79}\text{Au})$ et son énergie de liaison par nucléon.

Données : masse du noyau d'or 197 : $m_0 = 3,269\,96 \cdot 10^{-25}$ kg.

Masse d'un proton : $m_p = 1,672\,6 \cdot 10^{-27}$ kg ; masse d'un neutron : $m_n = 1,674\,9 \cdot 10^{-27}$ kg.

Célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \cdot 10^8$ m · s⁻¹ ; charge de l'électron : $q = -1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

Exercice 4 Énergie de liaison d'un noyau de cobalt 60

- 1 Connaissant la masse $m = 59,933\,806$ u d'un atome de cobalt 60 : ${}^{60}_{27}\text{Co}$ ainsi que la masse d'un proton : $m_p = 1,007\,277$ u et celle d'un neutron : $m_n = 1,008\,665$ u, calculer la valeur

approximative de l'énergie de liaison, en MeV, dans le cobalt 60 en assimilant la masse du noyau à celle de l'atome.

② Connaissant la masse d'un électron : $m_e = 5,49 \cdot 10^{-4} \text{ u}$, calculer la masse du noyau de cobalt 60 et en déduire la valeur de l'énergie de liaison en MeV.

L'approximation de la première question est-elle satisfaisante si l'on se contente d'un résultat avec une précision de 1 % ?

③ Calculer l'énergie de liaison par nucléon dans un noyau de cobalt 60.

Masse d'un proton : $m_p = 1,672\ 6 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; masse d'un neutron : $m_n = 1,674\ 9 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

Données : Célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; charge de l'électron : $q = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $1 \text{ u} = 1,660\ 5 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Exercice 5 Énergie de liaison du noyau de carbone 12

On rappelle qu'exprimer la masse d'une particule en MeV/c^2 , c'est tout simplement indiquer la valeur de son énergie de masse en MeV.

Calculer, en MeV, l'énergie de liaison du noyau de carbone 12 et son énergie de liaison par nucléon.

Données : masse d'un noyau de carbone 12 : $m_0 = 11\ 175 \text{ MeV}/c^2$, masse d'un proton : $m_p = 938,3 \text{ MeV}/c^2$, masse d'un neutron : $m_n = 939,6 \text{ MeV}/c^2$.

► **Connaître les lois de conservation de la charge électrique, du nombre de nucléons et de l'énergie**

Exercice 6 Particules à identifier

① Les noyaux de phosphore du nucléide $^{30}_{15}\text{P}$ sont radioactifs β^+ . Écrire l'équation de cette désintégration radioactive et vérifier qu'elle respecte les lois de conservation de la charge électrique et du nombre de nucléons.

② le noyau de phosphore 30 est artificiel : il est obtenu en bombardant une feuille d'aluminium par des particules α : les noyaux d'aluminium : $^{27}_{13}\text{Al}$ réagissent avec cette particule en donnant un noyau de phosphore 30 et une autre particule que l'on demande d'identifier en écrivant l'équation de la réaction.

③ Le rayonnement cosmique contient cette même particule, mentionnée à la question précédente. Dans la haute atmosphère, cette particule réagit sur les noyaux d'azote $^{14}_7\text{N}$ du diazote de l'air en donnant un noyau de carbone 14 et une nouvelle particule que l'on demande d'identifier.

Quelle propriété du carbone 14 connaissez-vous ?

Exercice 7 Désintégration α du radium 226

Le radium 226 est radioactif α . Sa désintégration donne du radon 222. La différence entre l'énergie de masse du radium 226 et celle des produits de la désintégration (particule α et noyau de radon) vaut 4,9 MeV. L'énergie cinétique totale des produits de la réaction (c'est-à-dire la somme de l'énergie cinétique du noyau de radon et de l'énergie cinétique de la particule α) vaut parfois 4,9 MeV, parfois 4,7 MeV et parfois 4,4 MeV. Y a-t-il dans tous les cas conservation de l'énergie ?

Exercice 8 De l'uranium jusqu'au plomb

L'uranium 238 : $^{238}_{92}\text{U}$ se désintègre ainsi que ses « descendants » en émettant des particules α ou β^- jusqu'à l'obtention d'un nucléide stable : le plomb $^{206}_{82}\text{Pb}$. Calculer le nombre de désintégrations α et le nombre de désintégrations β^- .

►► Savoir interpréter la courbe d'Aston

Exercice 9 Vrai ou faux

Indiquer, pour chacune des propositions ci-dessous, si elle est exacte ou non, en précisant les raisons de votre choix.

- 1 Les noyaux les plus lourds sont les noyaux les plus stables.
- 2 Le noyau d'hydrogène 1 n'est pas stable.
- 3 Une réaction au cours de laquelle un noyau de lithium ${}^7_3\text{Li}$ se scinde en deux noyaux plus légers fournit de l'énergie.
- 4 Une réaction au cours de laquelle un noyau lourd se scinde en deux noyaux est appelée fission.

►► Savoir calculer l'énergie libérée par une réaction nucléaire

Exercice 10 Radioactivité du bismuth 212

Les noyaux de bismuth 212 : ${}^{212}_{83}\text{Bi}$ sont radioactifs α : ils se désintègrent en donnant une particule α et un atome de thallium (Tl).

Écrire l'équation de cette réaction et calculer, en MeV, l'énergie libérée par la désintégration d'un atome de bismuth.

Données : masse du noyau de bismuth 212 : $3,519\,422 \cdot 10^{-25}$ kg .

Masse du noyau de thallium obtenu : $3,452\,865 \cdot 10^{-25}$ kg ; masse de la particule α : $6,645\,6 \cdot 10^{-27}$ kg .

Célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \cdot 10^8$ m · s⁻¹ ; charge de l'électron : $q = -1,6 \cdot 10^{-19}$ C .

Exercice 11 Réacteur nucléaire utilisé pour la propulsion

La propulsion d'un sous-marin nucléaire utilise la fission de l'uranium 235.

Il existe une multitude de réactions de fission possibles pour l'uranium 235, mais nous supposons que toutes les fissions se font selon la réaction : ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{94}_{38}\text{Sr} + {}^{140}_{54}\text{Xe} + 2{}^1_0\text{n}$.

- 1 Calculer, en joule puis en MeV, l'énergie libérée par une fission.
- 2 Calculer la masse d'uranium 235 utilisé en un jour de fonctionnement, si le réacteur fournit une puissance utilisable de 10 MW avec un rendement de 1/3 (cela signifie que les réactions nucléaires doivent fournir une puissance de 30 MW dont seulement le tiers est utilisable).

Données :

Masse d'un noyau d'uranium 235 : 235,043 9 u ; masse d'un noyau de strontium 94 : 93,915 4 u.

Masse d'un noyau de xénon 140 : 139,925 2 u ; masse d'un neutron isolé : 1,008 7 u.

Célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \cdot 10^8$ m · s⁻¹ ; charge de l'électron : $q = -1,6 \cdot 10^{-19}$ C ; 1 u = $1,660\,5 \cdot 10^{-27}$ kg .

Exercice 12 Réaction de fusion deutérium-tritium

Calculer, en MeV, l'énergie libérée par la fusion d'un noyau de deutérium avec un noyau de tritium selon l'équation : ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$ à partir des valeurs indiquées dans le tableau ci-dessous :

	neutron	Hydrogène 2	Hydrogène 3	Hélium 4
Énergie de liaison (en MeV par nucléon)	0	1,10	2,80	7,05

►►► Connaître des exemples illustrant la libération d'énergie par réaction nucléaire

Exercice 13 Réacteur nucléaire

Lire attentivement le texte ci-dessous avant de répondre aux questions :

Dans la cuve du réacteur (1), les réactions de fission se produisant dans les barreaux d'uranium 235 dégagent de la chaleur. Ces barreaux contiennent de l'uranium enrichi contenant 3 % d'uranium 235 fissile, alors que l'uranium naturel contient surtout de l'uranium 238 et seulement 0,7 % d'uranium 235. L'uranium 238 n'est pas fissile, mais il absorbe des neutrons et se transforme après désintégrations radioactives en plutonium fissile.

Les barreaux de contrôle (2) contiennent du cadmium qui a la propriété d'absorber très fortement les neutrons, ce qui permet de réguler le flux de neutrons dans le réacteur. En cas d'accident (rupture des canalisations du circuit primaire) ces barres de sécurité tombent de façon à arrêter les réactions de fission. Toutefois, le dégagement d'énergie ne s'arrête pas instantanément et l'échauffement brutal et intense du cœur peut entraîner des surpressions provoquant d'énormes dégâts et la dissémination de produits radioactifs.

L'eau, qui circule dans ce circuit primaire, maintenue sous forte pression par le pressuriseur (3), va ensuite échauffer dans l'échangeur (4) l'eau du circuit secondaire puis est renvoyée par la pompe primaire (5) dans la cuve.

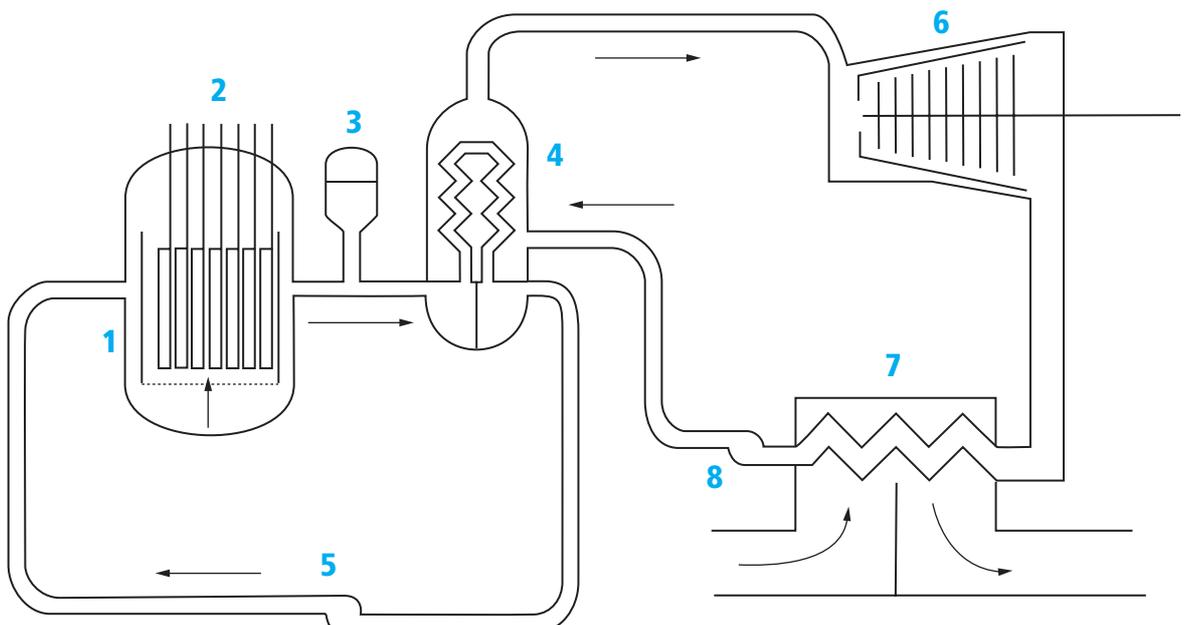
L'eau du circuit secondaire, échauffée dans l'échangeur, se transforme en vapeur d'eau sous forte pression, elle fait tourner la turbine (6) qui entraîne l'alternateur produisant le courant électrique.

La vapeur d'eau est ensuite refroidie dans le condenseur (7) (par l'eau d'un fleuve et l'air atmosphérique dans d'énormes tours de refroidissement) avant d'être envoyée à nouveau par la pompe (8), sous forme liquide, dans l'échangeur.

Dans ces réacteurs, appelés réacteurs à eau pressurisée ou réacteurs PWR (Pressurized water reactor), l'eau du circuit primaire sert à la fois de fluide caloporteur (elle transporte la chaleur jusqu'à l'échangeur) et de modérateur (elle ralentit par chocs les neutrons qui « sautent » d'un barreau d'uranium à l'autre, les rendant ainsi plus efficaces).

Un tel réacteur fournit couramment une puissance électrique de 1 000 MW_e pour une puissance thermique de 3 000 MW_{th}, fournie par la fission de l'uranium.

Périodiquement, les barreaux (appelés aussi crayons) contenant l'uranium 235 doivent être changés, ils peuvent ensuite être retraités pour retirer l'uranium 235 qu'ils contiennent encore et le plutonium qui s'est formé, et les déchets doivent ensuite être stockés.



Questions :

- 1 Il existe d'autres types de réacteurs que celui présenté dans ce texte. Ainsi, dans les réacteurs BWR (boiling water reactor), il n'existe pas deux circuits (primaire et secondaire), mais un seul : l'eau liquide est vaporisée dans le cœur du réacteur puis envoyée directement dans la turbine qu'elle fait tourner. Quel inconvénient présente ce type de réacteur ?
- 2 L'uranium 238, qui n'est pas fissile, se transforme par absorption d'un neutron, en uranium 239 qui donne du plutonium 239 après deux désintégrations radioactives β^- . Écrire les équations de ces deux désintégrations.
- 3 Qu'appelle-t-on « déchets » dans ce texte ? Quel problème pose leur stockage ?
- 4 Expliquer la différence entre MW_e (mégawatt électrique) et MW_{th} (mégawatt thermique).
- 5 Qu'appelle-t-on « enrichissement de l'uranium » ?

Exercice 14 L'énergie des étoiles

L'énergie émise par des étoiles comme le Soleil qui sont d'énormes boules d'hydrogène provient de la réaction de fusion des noyaux d'hydrogène 1 (ou protons). En plusieurs étapes, quatre protons fusionnent pour donner de l'hélium et deux positons.

- 1 Écrire l'équation traduisant la fusion des quatre protons.
- 2 Pourquoi les réactions de fusion de l'hydrogène se produisent-elles dans le soleil alors qu'elles ne se produisent pas (heureusement) lorsqu'on manipule des flacons d'hydrogène ?
- 3 Sachant que la puissance totale rayonnée par le Soleil vaut $4 \cdot 10^{26} \text{ W}$, calculer la perte de masse du Soleil en une seconde.
- 4 Existe-t-il actuellement des réacteurs nucléaires produisant de l'électricité à partir de réactions de fusion ?

Chimie

Objectifs

- ▶ Définir un acide ou une base selon Brønsted.
- ▶ Écrire l'équation de la réaction associée acido-basique et identifier dans cette équation les deux couples mis en jeu.
- ▶ Connaître la définition du pH pour les solutions aqueuses diluées.
- ▶ Être capable de mesurer la valeur du pH d'une solution aqueuse avec un pH-mètre.
- ▶ Connaître la définition du taux d'avancement final et le déterminer à partir d'une mesure.
- ▶ Connaissant la valeur de la concentration et du pH d'une solution d'acide, calculer l'avancement final de la réaction de cet acide sur l'eau et le comparer à l'avancement maximal.
- ▶ Savoir que, lorsque l'état d'équilibre du système est atteint, les quantités de matière n'évoluent plus, et que cet état d'équilibre est dynamique.

L'objectif principal de ce chapitre est de répondre à la question : « la transformation d'un système chimique est-elle toujours totale ? ».

A Acide et base

Une solution aqueuse s'obtient en dissolvant un ou plusieurs **solutés** dans l'eau qui constitue le **solvant** ; le soluté est donc l'espèce chimique dissoute ; le soluté est toujours en faible quantité par rapport au solvant.

Versons 100 mL d'une solution d'acide chlorhydrique (solution ionique contenant des ions hydronium H_3O^+ et chlorure Cl^-) de concentration $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ dans un bécher. Mesurons la température de l'acide à l'aide d'un thermomètre : $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ajoutons 100 mL d'une solution d'hydroxyde de sodium (solution ionique contenant des ions hydroxyde OH^- et sodium Na^+) de concentration $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (à $20 \text{ }^\circ\text{C}$).

À l'aide du thermomètre, nous pouvons constater une augmentation de température du système formé jusqu'à environ $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Le système a donc subi une transformation.

Activité 1 *Quelle est la composition du système dans son état initial ? (on demande la formule des ions)*

Afin de déterminer l'équation de la réaction associée à cette transformation, on chauffe ensuite le mélange obtenu de façon à provoquer l'évaporation de l'eau (solvant).

On constate, après déshydratation, l'apparition d'un dépôt blanchâtre sur les parois et le fond du récipient. Ce dépôt est du chlorure de sodium de formule NaCl .

Activité 2 *Quelle est la nature des cristaux de chlorure de sodium : moléculaire ou ionique ?*

Activité 3 *Écrire alors l'équation de la réaction chimique associée à la transformation.*

On constate que certains ions ne participent pas à la transformation ; ce sont des ions spectateurs.

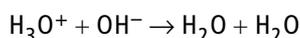
Activité 4 *Écrire alors l'équation simplifiée.*

Dans cette réaction, l'ion hydronium H_3O^+ joue le rôle d'**acide** : il cède un proton H^+ à l'ion hydroxyde OH^- qui joue le rôle de **base** : il capte ce proton.

Une telle réaction est appelée réaction acido-basique et consiste en un **transfert de proton H^+** de l'acide vers la base.

B Couples acide-base

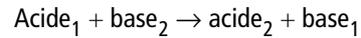
Dans la réaction précédente :



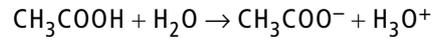
L'acide H_3O^+ a perdu un proton et devient une molécule d'eau H_2O ; l'eau est la **base conjuguée** de l'acide H_3O^+ ; H_3O^+ et H_2O constituent donc un **couple acide-base** noté $\text{H}_3\text{O}^+/\text{H}_2\text{O}$.

De même, la base OH^- a gagné un proton pour devenir une molécule d'eau ; l'eau est donc **l'acide conjugué** de l'ion hydroxyde ; OH^- et H_2O constituent un couple acide-base noté $\text{H}_2\text{O}/\text{OH}^-$.

Cette réaction acido-basique fait intervenir 2 couples acide-base ; l'acide d'un couple réagit avec la base de l'autre couple (pour donner base et acide conjugués), selon l'équation générale :



Activité 5 Identifier les 2 couples acide-base dans l'équation de réaction :



À noter que l'eau peut jouer le rôle d'acide dans le couple $\text{H}_2\text{O}/\text{OH}^-$ ou de base dans le couple $\text{H}_3\text{O}^+/\text{H}_2\text{O}$: l'eau est appelée un **ampholyte**.

Activité 6 À partir des couples $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HSO}_4^-$ et $\text{HSO}_4^-/\text{SO}_4^{2-}$ montrer que l'ion hydrogénosulfate HSO_4^- est un ion ampholyte.

A Définition du pH

Les propriétés acides de l'acide chlorhydrique peuvent être mises en évidence à l'aide d'une solution appelée indicateur coloré et dont la couleur dépend du caractère plus ou moins acide ou basique de la solution avec laquelle il se trouve. Pour préciser (et quantifier) le caractère acide ou basique d'une solution, on définit son pH.

Le pH d'une solution est une grandeur qui a été introduite par le chimiste danois Soerensen en 1909.

Le pH d'une solution aqueuse est l'opposé du logarithme décimal de sa concentration en ions hydrogène exprimée en $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$;

$$\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+] \text{ (ou : } [\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}} \text{)}$$

Le pH est une **grandeur positive** (entière ou décimale) et **sans dimension** (sans unité).

Activité 7 Calculer le pH d'une solution possédant $[\text{H}_3\text{O}^+] =$

$1,0 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

$5,0 \cdot 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

Calculer la valeur de $[\text{H}_3\text{O}^+]$ d'une solution de pH :

5,0

4,3

Activité 8 Compléter la phrase : « La fonction logarithme étant une fonction croissante, si 2 solutions 1 et 2 sont telles que : $[\text{H}_3\text{O}^+]_1 > [\text{H}_3\text{O}^+]_2$ alors pH_1 , le pH de la solution 1 sera ... à pH_2 , le pH de la solution 2.

Le pH d'une solution est d'autant plus faible que sa concentration en ions H_3O^+ est plus élevée.

B Mesure du pH

On donne ci-dessus la couleur de chacun des 3 indicateurs colorés en solution, d'abord fraîchement distillée, puis dans une solution d'acide chlorhydrique à $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$:

Indicateur coloré	Eau distillée	Acide chlorhydrique
Hélianthine	Orangé	Rouge
Bleu de bromothymol	Vert	Jaune
Phénolphaléine	Incolore	Incolore

La mesure du pH d'une solution aqueuse (qui nous permettra de savoir si la solution est acide ou non) peut se faire à l'aide d'un papier indicateur de pH, papier imbibé d'un mélange d'indicateurs colorés puis séché.

Le fait de déposer une goutte de solution sur ce papier lui fait prendre une couleur que l'on compare aux couleurs étalons sur la boîte.

Méthode rapide mais peu précise

Il est possible aussi d'utiliser un pHmètre :

Un pHmètre est un voltmètre qui mesure la tension existant entre ses 2 bornes appelées ici électrodes, et qui transforme ce résultat en valeur de pH. Un pHmètre possède :

- une électrode de référence dont le potentiel est constant ;
- une électrode de mesure dont le potentiel est fonction affine du pH.

La f.é.m. de la pile formée par ces 2 électrodes plongées dans une solution est donc une fonction affine du pH de cette solution :

$$e = E_{\text{mesure}} - E_{\text{référence}}$$
$$e = a - b \times \text{pH}$$

Un étalonnage préalable du pHmètre avec une solution-étalon permet d'effectuer ensuite une lecture directe du pH.

La mesure du pH de différentes solutions d'acide chlorhydrique s'effectue suivant le protocole opératoire :

- placer 30 mL de solution d'acide chlorhydrique de concentration C_A dans un bécher de 100 mL ;
- plonger la cellule du pHmètre, préalablement étalonné, dans la solution ;
- lire la valeur du pH affichée par l'appareil.

Activité 9 *Faut-il mesurer avec précision le volume de la solution d'acide versée dans le bécher ? Expliquer.*

La mesure du pH d'une solution est connue à 0,05 unité près ce qui entraîne une incertitude de l'ordre de 10 % sur la concentration en ions hydronium !

A Réactions totales et réactions non totales

L'acide éthanóique pur (ou acide acétique) est un liquide incolore, corrosif et à odeur piquante. C'est le principal constituant du vinaigre (en dehors de l'eau).

Sa formule est : CH_3COOH .

Activité 10 *L'acide acétique pur est-il conducteur du courant ? Pourquoi ?*

Quelle expérience réaliser pour le vérifier ? À quel résultat doit-on s'attendre alors ?

L'acide acétique est miscible à l'eau ; on obtient une solution aqueuse d'acide éthanóique. La dissolution est exothermique. D'autre part, un conductimètre montre que la conductance de la solution est très supérieure à celle de l'acide pur.

Activité 11 *Quelles conclusions ces renseignements nous permettent-ils de faire ?*

En effet, ces ions ne peuvent provenir uniquement de l'eau distillée ajoutée car celle-ci ne conduit pas suffisamment le courant.

Activité 12 *Sachant que la réaction entre l'acide acétique et l'eau est une réaction acido-basique dans laquelle l'eau joue le rôle de base, trouver les 2 couples acide-base intervenant et en déduire l'équation de la réaction chimique associée à cette transformation.*

La concentration d'une solution d'acide éthanóique correspond à la quantité (en mol) d'acide CH_3COOH introduit (dissous) dans de l'eau de manière à obtenir 1 litre de solution ; on notera cette concentration $[\text{CH}_3\text{COOH}]_i$ (i comme état initial).

La mesure du pH d'une solution d'acide éthanóique à $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ en acide donne : $\text{pH} = 3,4$.

Activité 13 a) *En déduire la valeur de la concentration en ions H_3O^+ de cette solution.*

b) *Comparer les valeurs de $[\text{CH}_3\text{COOH}]_i$ et $[\text{H}_3\text{O}^+]$. Peut-on dire que la transformation est totale ?*

c) *Calculer la valeur de l'avancement final X_{final} de la réaction (X à l'état final), ainsi que la valeur de l'avancement maximal X_{maximal} de la réaction (X si la réaction était totale) (pour 1 litre de solution).*

On voit que les valeurs de X_{final} et X_{maximal} sont différentes car la réaction n'est pas totale.

Activité 14 *Qu'en serait-il si la réaction était totale ?*

Une transformation peut donc ne pas être totale. Pour préciser cette caractéristique et comparer les transformations les unes par rapport aux autres, on définit la notion de **taux d'avancement final** τ (lire : tau) d'une réaction, qui est égal au quotient de l'avancement final par l'avancement maximal :

$$\tau = \frac{X_{\text{final}}}{X_{\text{maximal}}}$$

Activité 15

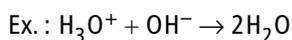
a) Calculer la valeur de τ dans le cas de la solution étudiée précédemment. Quelle est son unité ?

b) Quelle est la valeur de τ pour une réaction totale ?

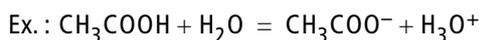
Plus la valeur du taux d'avancement final τ est élevée, plus la transformation associée est avancée.

Pour distinguer les transformations totales de celles qui ne le sont pas, l'écriture de l'équation de réaction est différente :

L'équation d'une réaction associée à une transformation totale est représentée par une simple flèche.



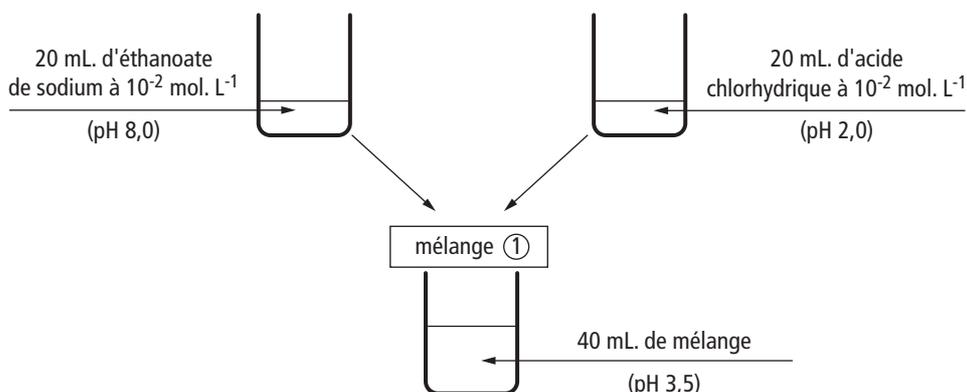
L'équation d'une réaction associée à une transformation non totale est représentée par deux flèches en sens inverses ou par un signe « égal » : =. (nous choisirons le signe : = par la suite).



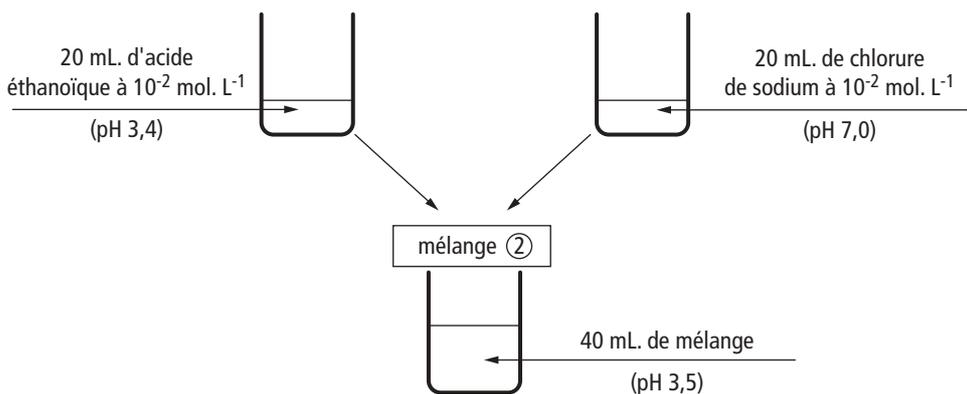
B Équilibre chimique

Une solution d'éthanoate de sodium est constituée d'ions éthanoate CH_3COO^- et sodium Na^+ .

On procède aux expériences suivantes :



Puis, d'autre part :

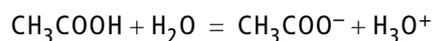


On remarque que les 2 systèmes chimiques différents arrivent au même état final : on trouve le même pH pour les 2 solutions obtenues donc ces 2 solutions ont les mêmes concentrations en ions H_3O^+ (ainsi que OH^- , CH_3COO^- et en acide CH_3COOH).

Activité 16

Écrire l'équation de la réaction associée à la transformation se produisant lors du mélange conduisant à la solution 1, ainsi que celle conduisant à la solution 2. (il s'agit de réactions acido-basiques).

On voit que les équations écrites sont **inverses** l'une de l'autre ; autrement dit, la **réaction** associée aux transformations précédentes **s'effectue dans les 2 sens** (ce qui justifie l'utilisation du symbole \rightleftharpoons) :



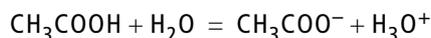
Dans chaque système précédent, les 2 transformations se produisent et conduisent ainsi au même état final qui est appelé **état d'équilibre du système**. À ce moment, les transformations se compensent exactement.

L'existence de cet équilibre résulte donc de l'existence d'une transformation non totale.

Activité 17 *Calculer la valeur du taux d'avancement final τ de la réaction pour le mélange 1.*

Interprétation de la notion d'équilibre chimique

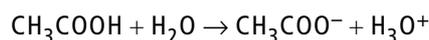
L'étude de la notion d'équilibre chimique s'est faite sur l'exemple de la réaction :



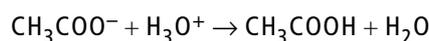
À l'état final, la composition du système n'évolue plus ; dans le cas du mélange 2 précédent, on peut construire le tableau :

Équation chimique		$\text{CH}_3\text{COOH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_3\text{O}^+$			
État du système	Avancement	Quantités de matière (mol.)			
État initial	0	$2,0 \cdot 10^{-4}$		0	0
En cours de transformation	X	$2,0 \cdot 10^{-4} - X$		X	X
État final	X_{final}	$2,0 \cdot 10^{-4} - 40 \cdot 10^{-3} \times 10^{-3,5} = 1,87 \cdot 10^{-4}$		$40 \cdot 10^{-3} \times 10^{-3,5} = 1,26 \cdot 10^{-5}$	$40 \cdot 10^{-3} \times 10^{-3,5} = 1,26 \cdot 10^{-5}$

À l'état final, tout se passe comme si les 2 transformations :



Et :



s'arrêtaient. En réalité, elles se poursuivent toujours, mais elles se compensent exactement.

L'arrêt des deux transformations n'est qu'apparent. L'équilibre chimique est appelé, pour cette raison, équilibre **dynamique**.

Notez bien que les 2 transformations ne se compensent qu'à l'équilibre.

Interprétation à l'échelle microscopique (ou atomique) :

À l'état final, le système est constitué de molécules d'eau, d'acide éthanoïque, d'ions hydronium et d'ions acétate.

Il se produit un certain nombre de chocs efficaces entre molécules CH_3COOH et H_2O par seconde (qui vont donner des ions CH_3COO^- et H_3O^+) et le même nombre de chocs efficaces entre ions CH_3COO^- et H_3O^+ par seconde (qui vont donner des molécules CH_3COOH et H_2O).

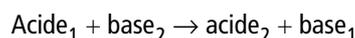
Ainsi, si le nombre de chocs efficaces entre entités réactives d'une part et entre entités produites d'autre part, est le même à chaque instant, la composition du système n'évolue pas.

Par analogie, si le nombre d'habitants d'une ville est stable pendant une période donnée, c'est que le nombre de naissances a été égal au nombre de décès durant cette période, et non parce qu'il n'y a eu ni naissances, ni décès.

Résumé

Une réaction acido-basique consiste en un transfert de proton H^+ de l'acide vers la base.

Cette réaction acido-basique fait intervenir 2 couples acide-base ; l'acide d'un couple réagit avec la base de l'autre couple (pour donner base et acide conjugués), selon l'équation générale :



Une espèce chimique pouvant jouer le rôle d'acide et de base est appelée un ampholyte (c'est le cas de l'eau).

Le pH d'une solution aqueuse est l'opposé du logarithme décimal de sa concentration en ions hydronium exprimée en $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$:

$$\text{pH} = -\log [H_3O^+] \quad (\text{ou} : [H_3O^+] = 10^{-\text{pH}})$$

Le pH est une **grandeur positive** (entière ou décimale) et **sans dimension** (sans unité).

Le pH d'une solution est d'autant plus faible que sa concentration en ions H_3O^+ est plus élevée.

Le **taux d'avancement final** τ d'une réaction est égal au quotient de l'avancement final par l'avancement maximal :

$$\tau = \frac{X_{\text{final}}}{X_{\text{maximal}}}$$

Plus la valeur du taux d'avancement final τ est élevée, plus la transformation associée est avancée.

L'équation d'une réaction associée à une transformation non totale est représentée par deux flèches en sens inverses ou par un signe « égal » : =.

La **réaction** associée à une transformation non totale **s'effectue dans les 2 sens** (ce qui justifie l'utilisation du symbole =).

Les 2 transformations se produisent et conduisent ainsi au même état final qui est appelé **état d'équilibre du système**.

À ce moment, les transformations se compensent exactement.

L'existence de cet équilibre résulte donc de l'existence d'une transformation non totale.

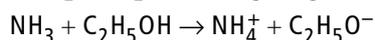
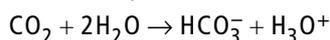
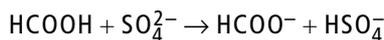
À l'état final, tout se passe comme si les 2 transformations s'arrêtaient. En réalité, elles se poursuivent toujours, mais elles se compensent exactement.

L'arrêt des deux transformations n'est qu'apparent. L'équilibre chimique est appelé, pour cette raison, équilibre **dynamique**.

Exercices d'application

Exercice 1 Réactions acido-basiques

Identifier les couples acide-base dans les équations de réactions suivantes :



Exercice 2 Réactions acido-basiques (bis)

Écrire l'équation de la réaction chimique entre les couples acide-base suivants :

H_2O , $\text{SO}_2/\text{HSO}_3^-$ et $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{CH}_3\text{COO}^-$ (SO_2 réactif)

$\text{NH}_3\text{OH}^+/\text{NH}_2\text{OH}$ et HClO/ClO^- (ClO^- réactif).

Exercice 3 Calculs de pH et de concentrations

Calculer le pH des solutions de concentration $[\text{H}_3\text{O}^+]$:

- $10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$
- $5 \cdot 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$
- $8 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

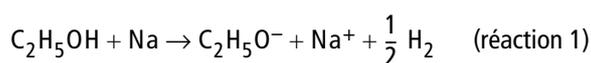
Calculer la concentration en ions hydronium des solutions de pH :

- 4
- 3,5
- 8,7

Exercices type bac

Exercice 4 Une base forte : l'ion éthanolate

L'éthanol, de formule $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, réagit avec le sodium suivant équation :



L'ion éthanolate $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}^-$ formé au cours de cette réaction réagit avec l'eau en donnant quantitativement de l'éthanol et des ions hydroxyde : l'équation de sa réaction avec l'eau est appelée réaction 2.

Données :

– masses molaires atomiques

$$M(\text{Na}) = 23 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} \quad M(\text{O}) = 16 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$M(\text{C}) = 12 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} \quad M(\text{H}) = 1 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

– masse volumique de l'éthanol : $\rho = 790 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.

① La réaction 1 peut-elle être considérée comme une réaction acido-basique ? Justifier la réponse.

Dans 20 mL d'éthanol pur on introduit 1,0 g de sodium ; une réaction assez vive, exothermique, se produit, accompagnée d'un dégagement gazeux important.

② Montrer que l'éthanol est introduit en excès par rapport au sodium.

③ Écrire l'équation de la réaction 2 et identifier, en la justifiant, sa nature (acido-basique ou oxydoréduction).

Exercice 5 Identification de solutions

Trois béchers contiennent respectivement un même volume $V = 100 \text{ cm}^3$ de solutions différentes mais de même concentration $C = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. On numérote chaque bécher, on mesure le pH. Toutes les mesures sont effectuées à la même température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Numéro de bécher	1	2	3
pH	2,9	7,0	10,6

Chaque solution a été préparée par dissolution dans l'eau distillée de l'un des 3 corps suivants :

- chlorure de sodium
- ammoniac (NH_3)
- acide méthanoïque

① Identifier la solution se trouvant dans chaque bécher en justifiant votre choix.

② Écrire l'équation de la réaction avec l'eau de l'ammoniac d'une part et de l'acide méthanoïque d'autre part.

Exercice 6 L'acide benzoïque

L'acide benzoïque, de formule $\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}$, est un solide blanc peu soluble dans l'eau ; c'est un conservateur utilisé dans l'industrie alimentaire, en particulier dans les boissons, où il est désigné par son code européen « E 210 ».

On dispose d'une solution A d'acide benzoïque de concentration $C_A = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

① Quelle est la masse d'acide benzoïque utilisé pour préparer 500 mL de solution A ?

② Rappeler les définitions d'un acide et d'une base.

Quelle est la formule de l'ion benzoate, base conjuguée de l'acide benzoïque ?

Le pH de la solution ainsi fabriquée est de 3,1.

③ Écrire l'équation de la réaction de l'acide benzoïque sur l'eau.

④ Quelle est la valeur du taux d'avancement final de la réaction ? La transformation est-elle totale ?

Données : masse molaire de l'acide benzoïque : $122 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

Exercice 7 Taux d'avancement final

Calculer l'avancement final puis le taux d'avancement final des réactions des acides suivants sur l'eau :

a) pH d'une solution d'acide méthanoïque de volume 100 mL et de concentration $5 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$: 3,1.

b) pH d'une solution d'acide borique H_3BO_3 de volume 200 mL et de concentration $3 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$: 5,4.

c) pH d'une solution d'acide ascorbique $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ de volume 250 mL et de concentration $5 \cdot 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$: 6,2.

Quelle est la transformation la plus avancée ?

Séquence

4

- > **Physique :**
Évolution d'un système électrique contenant un condensateur
- > **Chimie :**
État d'équilibre d'un système chimique

Sommaire

Séquence 4

Physique > Évolution d'un système électrique contenant un condensateur

Chapitre 1	>	Le condensateur	117
		A Description	
		B Charge des armatures	
		C Relation charge-intensité	
		D Relation charge-tension	
Chapitre 2	>	Cas du dipôle RC	120
		A Réponse d'un dipôle RC à un échelon de tension	
		B Energie emmagasinée dans un condensateur	
		C Continuité de la tension aux bornes du condensateur	
	>	Résumé	127
	>	Exercices	128

Chimie > État d'un équilibre d'un système chimique

Chapitre 1	>	Quotient de réaction	135
		A Définition	
		B Généralisation à divers exemples	
Chapitre 2	>	Constante d'équilibre	137
Chapitre 3	>	Influence de divers facteurs sur le taux d'avancement final d'une réaction	139
		A Influence de l'état initial du système	
		B Influence de la constante d'équilibre	
	>	Résumé	140
	>	Exercices	141

Physique

Objectifs

- ▶ Connaître la représentation symbolique d'un condensateur et savoir exploiter les relations entre tension aux bornes du condensateur et intensité du courant dans la branche contenant le condensateur.
- ▶ Savoir que la tension aux bornes d'un condensateur n'est jamais discontinue.
- ▶ Connaître l'expression de l'énergie emmagasinée dans un condensateur.
- ▶ Savoir exploiter un document expérimental concernant la charge ou la décharge d'un condensateur.

Expérience préliminaire : établissement du courant dans un circuit

Dans le cours de physique de la classe de première, nous avons étudié quelques propriétés de circuits électriques en courant continu.

Dans cette partie, on s'intéresse à des phénomènes associés à des courants variables.

Les lois fondamentales utilisées en courant continu (loi des tensions, loi des intensités) seront dans les applications toujours valables pour les valeurs instantanées des tensions et des intensités variables.

Quels sont les éléments d'un circuit électrique qui permettent de contrôler l'évolution temporelle du courant électrique, c'est-à-dire l'évolution en fonction du temps ?

Dans cette expérience, on étudie l'établissement du courant dans trois branches en dérivation alimentées par un générateur de courant continu.

On compare visuellement, à l'établissement du courant, les éclaircissements :

- ▶ de la lampe L_1 mise en série avec une résistance,
- ▶ de la lampe L_2 mise en série avec une bobine,
- ▶ de la lampe L_3 mise en série avec un condensateur.

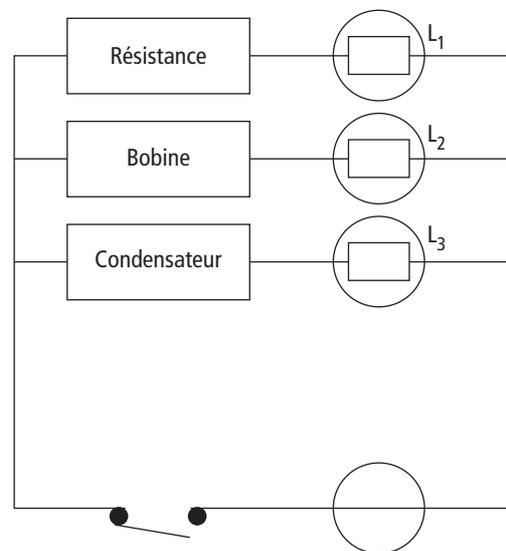


Observations :

- la lampe L_1 s'allume instantanément ; l'établissement du courant dans la branche du circuit où est placée une résistance (ou conducteur ohmique) est donc instantané.
- la lampe L_3 ne s'allume pas ; la présence d'un condensateur empêche l'établissement du courant continu dans la branche du circuit où il est placé.
- la lampe L_2 s'allume progressivement ; la présence d'une bobine freine donc l'établissement du courant continu dans la branche du circuit où elle est placée ;

Conclusion

Les systèmes électriques n'évoluent pas de la même façon suivant qu'ils contiennent un condensateur ou une bobine ; ces éléments particuliers vont permettre de contrôler l'évolution du courant électrique dans un circuit.



Dans ce chapitre nous étudierons le rôle particulier du condensateur dans un circuit ; dans la séquence 5 nous nous intéresserons au rôle de la bobine.

A Description

Un condensateur est constitué de deux armatures conductrices séparées par un isolant.

Cet isolant, encore appelé diélectrique, peut être de l'air, du mica, du téflon, un polyester, etc.

Exemple : deux feuilles métalliques (armatures) séparées par une feuille de papier paraffiné (isolant) que l'on enroule constituent un condensateur cylindrique.

Représentation symbolique d'un condensateur :



Activité 1 Citer une application en photographie où un condensateur est utilisé (on pourra utiliser une encyclopédie).

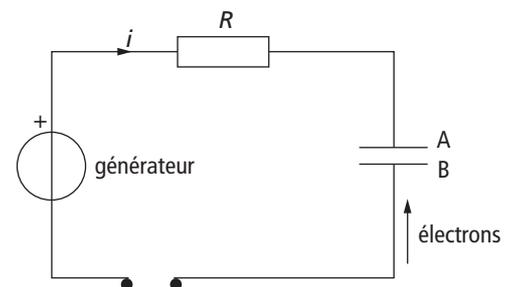
B Charge des armatures

Considérons le circuit ci-contre où le condensateur est relié à un générateur, un conducteur ohmique (appelé aussi résistance) R et un interrupteur K .

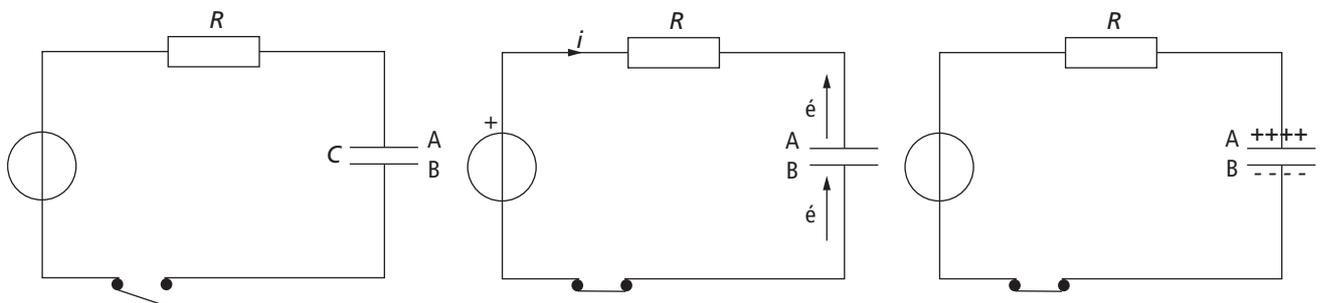
Lorsque l'on ferme l'interrupteur, un courant circule dans le circuit extérieur au générateur ; le déplacement d'électrons se traduit alors par un excès d'électrons sur une armature et un déficit sur l'autre.

Ces électrons ne traversent pas le diélectrique qui est isolant.

Le courant électrique ne pourra pas passer de façon continue car la chaîne des éléments conducteurs est interrompue par la présence de l'isolant.



Toutefois un appareil sensible détecte le passage d'un bref courant dans le circuit : lors de la fermeture de l'interrupteur, des électrons se sont déplacés vers la plaque notée B alors que d'autres électrons quittaient la plaque notée A.



Le passage du courant ne dure pas, car très rapidement les électrons provenant du générateur ne peuvent plus parvenir sur la plaque B qui est elle-même devenue négative et ne les accepte plus, de la même façon que la plaque A devenue positive retient à présent ses électrons.

Lorsque le courant a cessé de passer, le condensateur porte une charge positive $+q$ sur son armature A et une charge négative $-q$ sur son armature B, la somme des deux étant nulle.

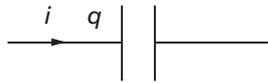
On appelle charge q du condensateur la charge portée par son armature positive (ici q_A).

q s'exprime en Coulomb (C).

C Relation charge – intensité

Nous avons déjà vu que l'orientation d'un circuit est indiquée par une flèche sur un fil de jonction, surmontée de i . Si le courant passe dans le sens de la flèche, alors i est positif ; si le courant passe en sens opposé, alors i est négatif.

Lorsque le sens d'orientation du circuit est donné, on appellera charge q du condensateur la charge de l'armature située la première dans le sens choisi (la flèche indiquant i pointe vers l'armature portant la charge q). Par la suite, nous orienterons toujours nos circuits comme indiqué sur le schéma ci-contre :



Avec cette convention, la charge q du condensateur et l'intensité i du courant sont liées par la relation :

$$i = \frac{dq}{dt} \quad \text{ce qui peut aussi se noter } i(t) = \frac{dq(t)}{dt}.$$

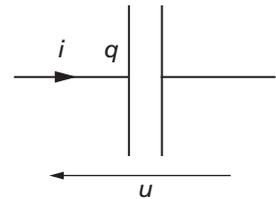
L'intensité est la dérivée de la charge électrique par rapport au temps ; nous noterons souvent.

Si $i > 0$, la charge q augmente et si $i < 0$, la charge q diminue.

D Relation charge – tension

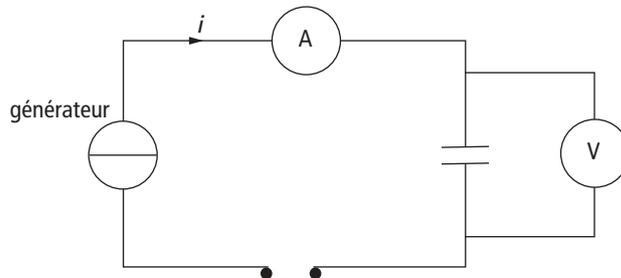
Dans ce paragraphe, nous allons rechercher la relation existant entre la charge q et la tension u aux bornes du condensateur.

Cette tension u aux bornes du condensateur est représentée par une flèche sur le schéma ci-contre.



Activité 2

Dans le circuit ci-après, un générateur de courant permet de charger à intensité constante le condensateur placé dans le circuit. On relève la tension u aux bornes du condensateur à l'aide d'un voltmètre.



- Noter sur le schéma la charge q du condensateur.
- L'intensité I du courant étant constante, montrer que la charge q du condensateur est liée au temps de charge t par : $q = It$.
- Remplir le tableau suivant en utilisant les valeurs données ($I = 0,14 \text{ mA}$).

$t(\text{s})$	2	4	6	8	10	12	14
$u(\text{V})$	0,13	0,26	0,38	0,51	0,64	0,77	0,90
$q(\text{C})$							
$\frac{q}{u}$							

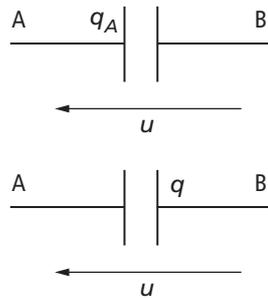
- Que pensez-vous du rapport $\frac{q}{u}$? Que peut-on en conclure quant à la relation existant entre la charge portée par un condensateur et la tension u à ses bornes ?

Vous noterez la réponse du corrigé dans le cadre ci-dessous.

Le coefficient de proportionnalité dépend uniquement des caractéristiques du condensateur, on l'appelle capacité C du condensateur, sa valeur s'exprime en Farad (abréviation F).

Activité 3 Déterminer la capacité du condensateur de l'activité 2.

La tension u est égale à la différence de potentiel entre les points A et B : $u = U_{AB} = V_A - V_B$.



$$q_A = Cu = CU_{AB} = C(V_A - V_B)$$

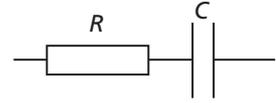
$$q = -Cu = -CU_{AB} = -C(V_A - V_B)$$

Activité 4 Donner la relation existant entre i , C et $\frac{du}{dt}$ dans les deux cas suivants (on notera la réponse du corrigé dans la colonne de droite) :

	$i =$
	$i =$

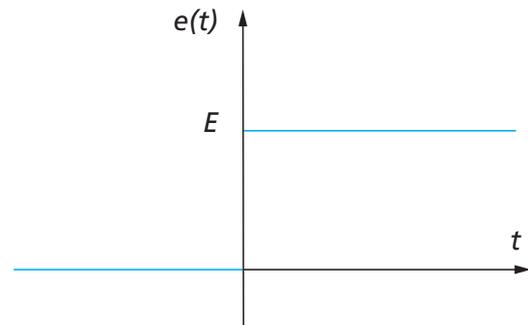
A Réponse d'un dipôle RC à un échelon de tension

Le dipôle RC est un dipôle comprenant en série une résistance et un condensateur.



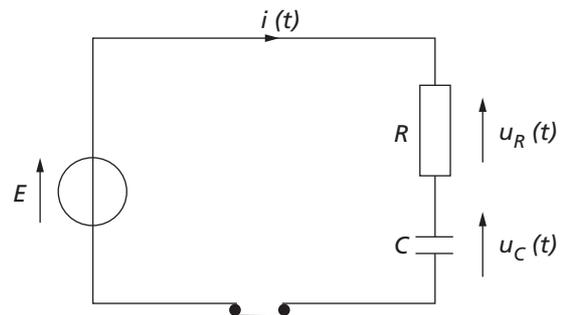
Un échelon de tension correspond à une tension $e(t)$ aux bornes du générateur qui vérifie :

- $e(t) = 0$ pour $t < 0$;
- $e(t) = E$ pour $t \geq 0$.



Pratiquement, on réalise un échelon de tension en utilisant le montage suivant ; à l'instant $t = 0$, on ferme l'interrupteur, le condensateur n'étant pas chargé ; le circuit est alors alimenté par une source idéale de tension $e(t) = E$.

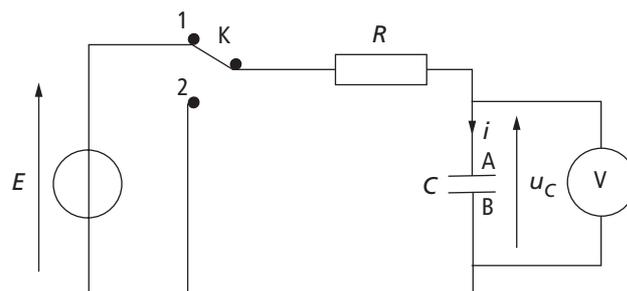
La réponse du circuit à l'excitation $e(t) = E$ correspond à l'évolution des grandeurs intensité $i(t)$, tension $u_R(t)$, charge $q(t)$ ou tension $u_C(t)$ en fonction du temps.



① Étude expérimentale de la charge d'un condensateur

Activité 5

Un condensateur de capacité C est chargé à l'aide d'un générateur idéal de tension de f.é.m. E ; le circuit est constitué du générateur, d'une résistance de valeur R et du condensateur placés en série (interrupteur K sur la position 1) ; on mesure la tension $u_C = U_{AB}$ aux bornes du condensateur à l'aide d'un voltmètre.



Données : $R = 10 \text{ k}\Omega$;
 $E = 4,5 \text{ V}$; $C = 3 \text{ mF}$.

On a obtenu les résultats suivants :

t(s)	0	10	20	30	40	50	60	80	100	130	150
u_C (V)	0	1,28	2,19	2,84	3,31	3,65	3,89	4,19	4,34	4,44	4,47
$\frac{u_C}{E}$											

- Tracer sur papier millimétré le graphique représentant $u_C = f(t)$.
- Commenter l'évolution de la tension u_C en fonction du temps t après avoir rempli la troisième ligne du tableau.
- Tracer l'asymptote horizontale correspondant à $u_C = 4,5$ V et la tangente à l'origine de la courbe ; déterminer l'abscisse τ du point de concours des deux droites. Comparer cette valeur au produit RC.
- Calculer le rapport $\frac{u_C}{E}$ au point d'abscisse τ .

Vous noterez la réponse du corrigé dans le cadre ci-dessous.

Activité 6 Vérifier l'unité du produit RC par analyse dimensionnelle.

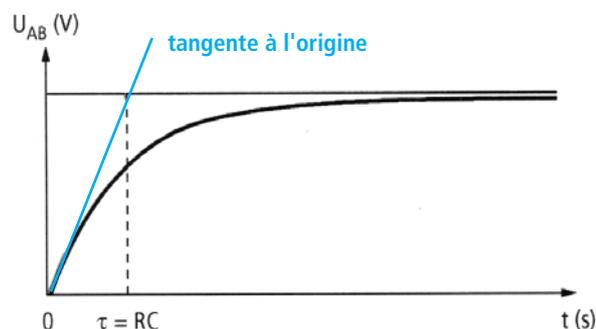
Activité 7 On étudie la durée τ nécessaire pour atteindre 63 % de la tension E (soit $0,63 E$) en modifiant les valeurs de R et de C ; τ est appelé constante de temps.

R(k Ω)	11	22	39	39	39
C(mF)	3	3	3	3	10
τ (s)	33	66	117	234	390

- Quelle relation existe-t-il entre la durée τ et la résistance du dipôle ?
- Quelle relation existe-t-il entre la durée τ et la capacité du dipôle ?
- Comparer le produit RC et le temps τ .

La constante de temps τ d'un dipôle RC est la durée pour laquelle la tangente à l'origine coupe l'asymptote horizontale : $\tau = RC$. Elle caractérise la rapidité de la charge.

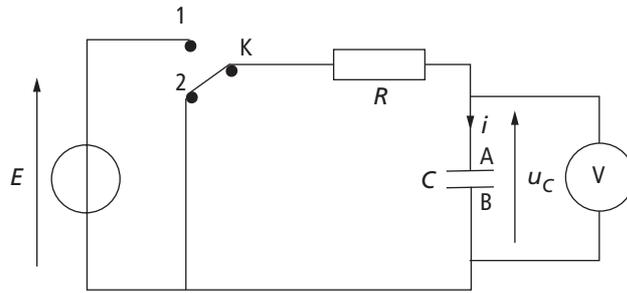
Au bout d'une durée égale à 5τ la charge est pratiquement totale.



2 Étude expérimentale de la décharge du condensateur

On reprend le circuit précédent lorsque la tension aux bornes du condensateur est égale à E ; l'interrupteur est alors placé en position 2.

Activité 8

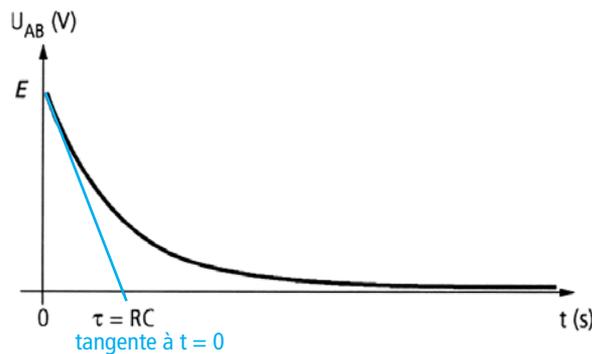


On a obtenu les résultats suivants :

t(s)	0	10	20	30	40	50	60	80	100	130	150
u_C (V)	4,5	3,22	2,31	1,65	1,19	0,85	0,61	0,31	0,16	0,06	0,03

- 1 Tracer sur papier millimétré le graphique représentant $u_C = U_{AB} = f(t)$.
- 2 Commenter l'évolution de la tension u_C en fonction du temps t.
- 3 Tracer la tangente à l'origine de la courbe ; déterminer l'abscisse τ du point de concours de la tangente avec l'axe des abscisses. Comparer cette valeur au produit RC.

Vous noterez la réponse du corrigé dans le cadre ci-dessous.



La constante de temps τ d'un dipôle RC est le temps pour lequel la tangente à la date $t = 0$ coupe l'asymptote $u_C = 0$. Elle caractérise la rapidité de la décharge.

3 Étude théorique de la charge et de la décharge d'un condensateur à travers une résistance R

Étude théorique de la charge

À l'instant $t = 0$ on ferme l'interrupteur.

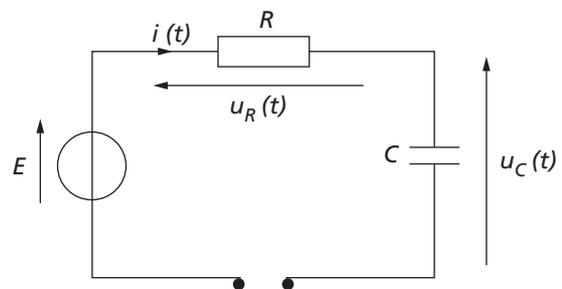
Nous supposons qu'initialement le condensateur est déchargé :

$$q(0) = 0 \text{ c'est-à-dire : } u_C(0) = 0.$$

La loi des mailles s'écrit :

$$E - u_R(t) - u_C(t) = 0$$

$$\text{avec } u_R(t) = Ri(t) = RC \frac{du_C(t)}{dt}.$$



Nous obtenons donc l'équation différentielle suivante : $RC \frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t) = E$.

Nous admettrons que la solution de cette équation différentielle s'écrit : $u_C(t) = Ae^{-\frac{t}{RC}} + B$.

Le terme RC a donc bien la dimension d'un temps ; nous retrouvons : $\tau = RC$.

Lorsque t tend vers l'infini, la tension $u_C(t)$ est constante et égale à E : $B = E$; la solution s'écrit

$$\text{donc : } u_C(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}} + E.$$

La constante A est déterminée par les conditions initiales : à $t = 0$, $u_C(0) = 0$

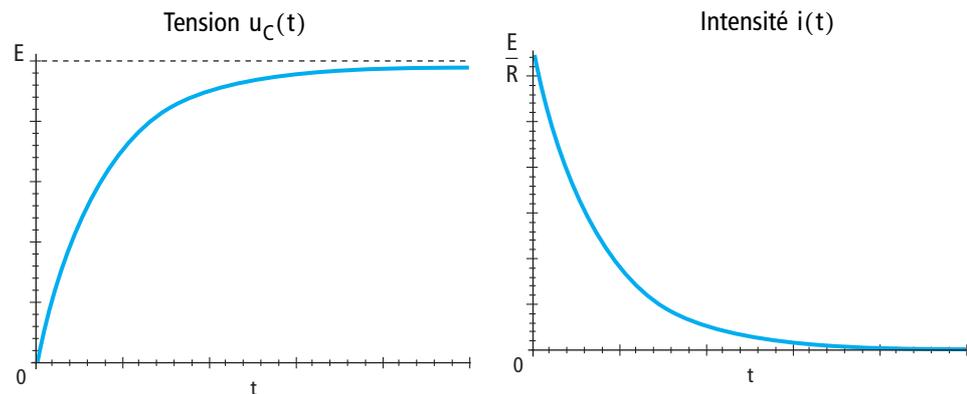
$$\text{d'où : } u_C(0) = E + A = 0 \Rightarrow A = -E.$$

$$\text{On en déduit : } u_C(t) = E\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right).$$

$$\text{L'intensité du courant en fonction de t s'obtient en écrivant : } i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = C \frac{du_C(t)}{dt} = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Rappel : la dérivée par rapport au temps de e^{-at} vaut $-ae^{-at}$.

Les graphiques représentant $u_C(t)$ et $i(t)$ sont représentés ci-après :



Étude théorique de la décharge

Nous supposons qu'initialement le condensateur est chargé : à $t = 0$, $q(0) = q_0$.

À l'instant $t = 0$ on ferme l'interrupteur.

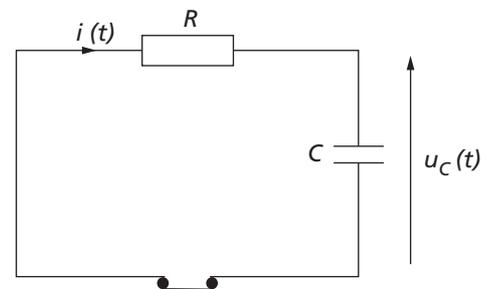
$$\text{La loi des mailles s'écrit : } RC \frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t) = 0.$$

La solution de cette équation différentielle s'écrit :

$$u_C(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}} \text{ avec : } \tau = RC.$$

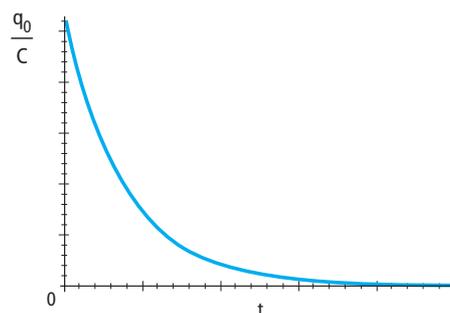
$$\text{À } t = 0, u_C(0) = \frac{q_0}{C} \text{ d'où :}$$

$$u_C(t) = \frac{q_0}{C} e^{-\frac{t}{RC}}.$$

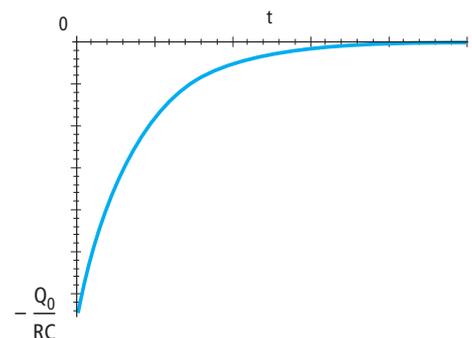


$$\text{L'intensité du courant s'exprime par : } i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = C \frac{du_C(t)}{dt} = -\frac{q_0}{RC} e^{-\frac{t}{RC}}.$$

Tension $u_C(t)$ en fonction de t

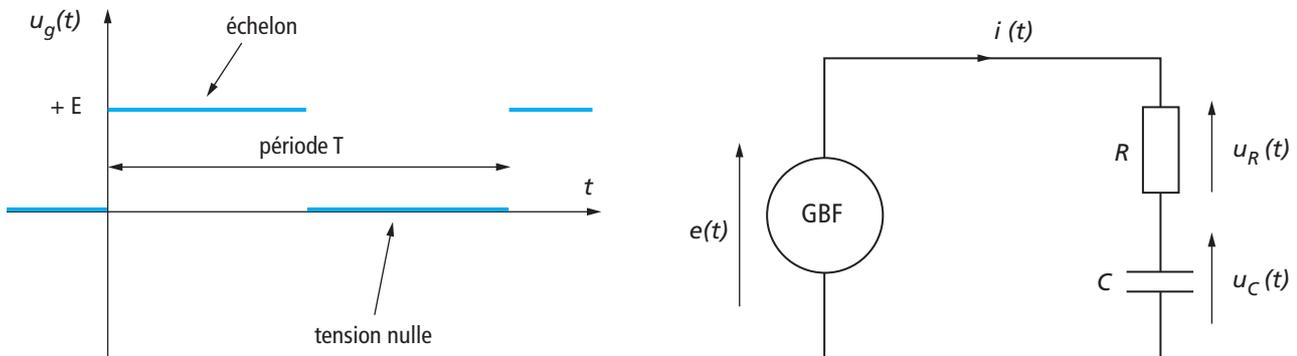


Intensité du courant en fonction de t



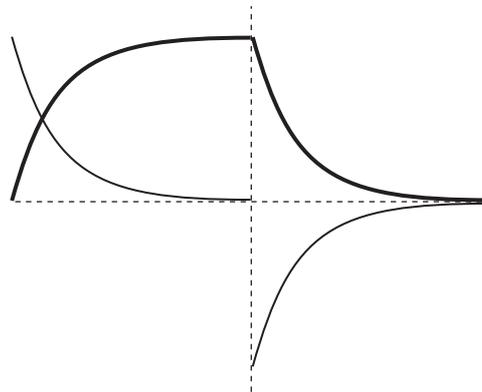
Activité 9 On étudie les réponses $u_C(t)$ et $i(t)$ pendant la charge et la décharge du condensateur en utilisant un oscilloscope à mémoire.

Pour réaliser un montage équivalent au précédent sans avoir à modifier la position de l'interrupteur, on utilise un générateur basses fréquences (GBF), un conducteur ohmique de résistance R , un condensateur de capacité C ; la tension aux bornes du générateur est représentée ci-dessous de même que le circuit ainsi que les branchements.



1 Comment doit-on choisir, en fonction de la constante de temps τ du circuit, la période T du générateur pour que l'on puisse observer une charge et une décharge pratiquement complète sur une période ?

2 Grâce à l'oscilloscope, on obtient l'oscillogramme de la figure ci-dessous.



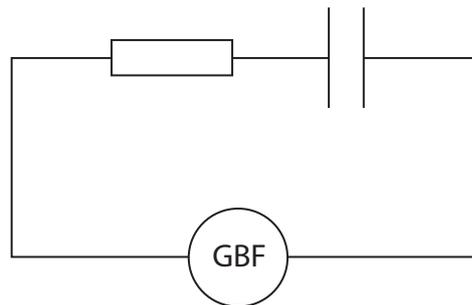
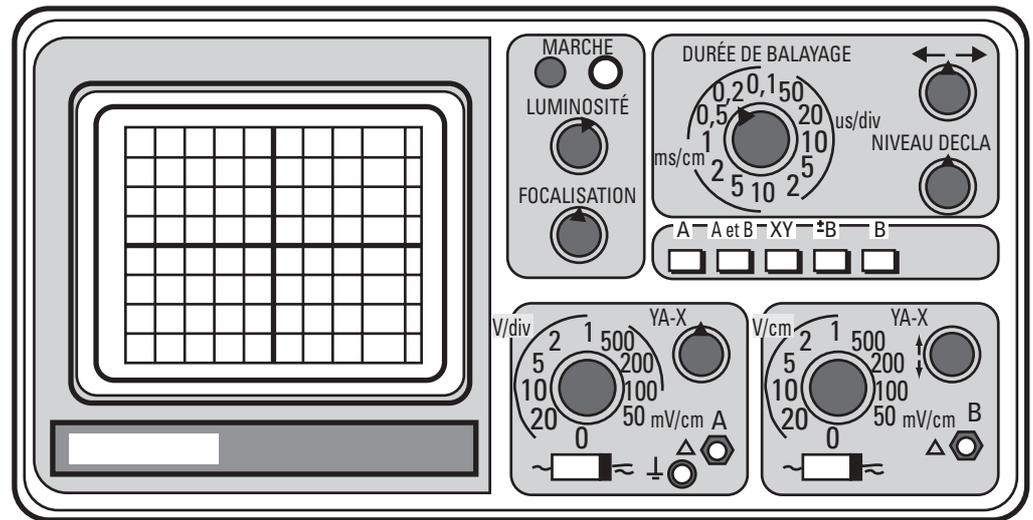
a) Quelles sont les courbes qui représentent :

- ▶ la tension $u_R(t)$,
- ▶ la tension $u_C(t)$?

b) En déduire celle qui permet de connaître les variations de l'intensité du courant en fonction du temps.

c) À quels phénomènes correspondent les deux parties des courbes ?

3 Sur le schémas du circuit et de l'oscilloscope proposés ci-après, représenter tous les branchements nécessaires et les fils de raccordement permettant d'obtenir cet oscillogramme.



B Énergie emmagasinée dans un condensateur

Dans un flash utilisé pour la photographie un condensateur emmagasine de l'énergie qui est restituée sous la forme d'un éclair ; le flash est d'abord mis en série avec une pile qui fournit de l'énergie au condensateur.

Lorsque le condensateur se décharge, il se comporte comme un générateur en créant un courant électrique dans la résistance branchée à ses bornes. Celle-ci perd sous forme de chaleur (par effet Joule) l'énergie que lui cède le condensateur. Bien entendu, cette énergie emmagasinée dans le condensateur n'a pu lui être fournie que par le générateur lors de l'opération de charge.

Nous admettons que l'énergie W emmagasinée par un condensateur de capacité C , lorsque la tension entre ses armatures est U , est donnée par la relation :

$$W = \frac{1}{2} C u^2 .$$

W s'exprime en joule (J) ; C en farad (F) et u en volt (V) .

Activité 10 Exprimer l'énergie stockée en fonction :

- ▶ de la charge q et de la tension u à ses bornes,
- ▶ de la charge q et de la capacité C du condensateur.

Activité 11 Calculer l'énergie emmagasinée par un condensateur de capacité C lorsqu'il a été chargé par une alimentation stabilisée de f.é.m. E .

Données : $C = 1 \text{ F}$; $E = 3 \text{ V}$.



Continuité de la tension aux bornes du condensateur

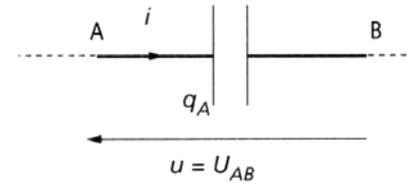
Le stockage et le déstockage de l'énergie ne peuvent jamais s'effectuer instantanément. Par conséquent, la tension aux bornes d'un condensateur ne subit pas de discontinuité.

Activité 12 *La charge du condensateur est-elle aussi continue ?*

Même question pour l'intensité du courant dans la branche contenant le condensateur.

Résumé

Le symbole d'un condensateur est :



La charge q_A de l'armature A est reliée à la tension U_{AB} : $q_A = CU_{AB}$.

L'intensité du courant s'exprime par : $i = \frac{dq_A}{dt} = C \frac{dU_{AB}}{dt}$.

La constante de temps τ d'un dipôle RC s'exprime par : $\tau = RC$.

Elle caractérise la rapidité de la charge (ou de la décharge). Au bout d'une durée égale à 5τ la charge est pratiquement totale.

Pendant la charge, la tension aux bornes du condensateur obéit à l'équation différentielle suivante :

$RC \frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t) = E$. La solution de cette équation différentielle s'écrit : $u_C(t) = Ae^{-\frac{t}{RC}} + E$.

La constante A est déterminée par les conditions initiales.

Pendant la décharge, la tension aux bornes du condensateur obéit à l'équation différentielle suivante :

$RC \frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t) = 0$. La solution de cette équation différentielle s'écrit : $u_C(t) = Ae^{-\frac{t}{RC}}$.

La constante A est déterminée par les conditions initiales.

L'énergie W emmagasinée par un condensateur de capacité C , lorsque la tension entre ses armatures est u , est donnée par la relation : $W = \frac{1}{2} Cu^2$.

La tension aux bornes d'un condensateur n'est jamais discontinue (de même que la charge puisque $q_A = CU_{AB}$).

Exercices

Exercice 1 Vrai ou faux

- 1 L'espace situé entre les armatures d'un condensateur est conducteur.
- 2 En régime permanent continu, le condensateur ne laisse pas passer le courant.
- 3 L'intensité du courant dans une branche contenant un condensateur est continue.
- 4 La somme des charges électriques portées par l'ensemble des deux armatures d'un condensateur est nulle.
- 5 L'énergie W emmagasinée par un condensateur de capacité C , lorsque sa charge est q , est donnée par la relation : $W = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}$.

Exercice 2 Charge et tension

Quelle est la relation entre la charge q_A portée par l'armature A d'un condensateur et la tension U_{AB} entre les armatures ? On précisera les unités.

Exercice 3 Quantité d'électricité

Un condensateur de capacité $C = 4,7 \text{ nF}$ présente entre ses bornes une tension $U_{AB} = 4,5 \text{ V}$.

- 1 Représenter la flèche tension U_{AB} sur le schéma normalisé du condensateur.
- 2 Indiquer le signe des charges électriques portées par chacune des armatures A et B.
- 3 Exprimer puis calculer la valeur de la quantité d'électricité q_B portée par l'armature B du condensateur.

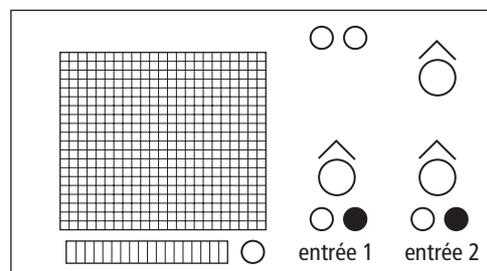
Exercice 4 Relation intensité-tension

Donner la relation entre l'intensité i et la tension U_{AB} aux bornes du condensateur après avoir précisé les sens du courant et de la flèche-tension sur un schéma.

Exercice 5 Schéma et branchements

On place en série une résistance, un condensateur, un interrupteur et un générateur de tension (alimentation stabilisée) ; on souhaite mesurer l'intensité du courant dans le circuit ainsi que la tension aux bornes du condensateur en utilisant des multimètres.

- 1 Faire le schéma du montage en reliant les différents dipôles par des fils de connexion.
- 2 On remplace les multimètres par un oscilloscope ; réaliser les branchements pour visualiser sur l'oscilloscope les tensions aux bornes du générateur et du condensateur.



Exercice 6 Dipôle (RC)

- 1 Un circuit est constitué d'un conducteur ohmique de résistance R , d'un condensateur de capacité C , d'un interrupteur et d'une alimentation stabilisée de f.é.m. E .

Exprimer en fonction des données la constante de temps τ du circuit pendant la charge du condensateur. Donner une interprétation physique de la constante de temps.

② Un circuit est constitué d'un conducteur ohmique de résistance R , d'un condensateur de capacité C , d'un interrupteur et d'un générateur de f.é.m. E et de résistance interne r .

Exprimer en fonction des données la constante de temps τ du circuit pendant la charge du condensateur.

Exercice 7 Charge d'un condensateur à intensité constante

Un condensateur de capacité C a été chargé par un courant d'intensité constante I_0 pendant une minute et trente secondes ; le circuit contenait une résistance R .

Données : $C = 10 \text{ mF}$; $R = 10 \text{ k}\Omega$; $I_0 = 2 \text{ mA}$.

- ① Exprimer et calculer la charge du condensateur.
- ② Exprimer et calculer la tension u aux bornes du condensateur ainsi chargé.

Exercice 8 Charge d'un condensateur

On place en série un conducteur ohmique de résistance R , un condensateur de capacité C (le condensateur n'est pas chargé), un interrupteur et un générateur de tension (alimentation stabilisée) de f.é.m. E .

Données : $C = 10 \text{ }\mu\text{F}$; $E = 4,5 \text{ V}$; $R = 10 \text{ k}\Omega$.

Exprimer et calculer la charge portée par ce condensateur après qu'il ait été relié au générateur de f.é.m. E pendant une seconde.

Exercice 9 Étude de la charge d'un condensateur

On réalise, pour charger un condensateur, le circuit en série comprenant un conducteur ohmique de résistance R , un condensateur de capacité C , un interrupteur et un générateur de tension.

Le générateur est caractérisé par sa f.é.m. E et sa résistance interne r .

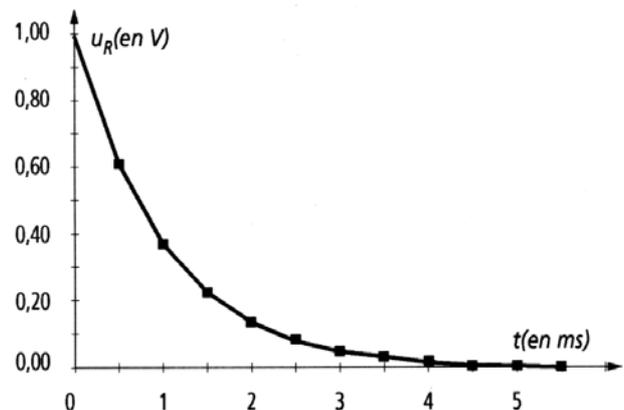
Données : $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$; $E = 10 \text{ V}$; $R = 900 \text{ }\Omega$; $r = 100 \text{ }\Omega$.

- ① À l'instant où l'on vient de fermer l'interrupteur, le condensateur étant encore non chargé, la tension à ses bornes est nulle. Quelle est alors la valeur de l'intensité du courant dans le circuit ?
- ② Une demi-milliseconde après la fermeture du circuit, l'intensité du courant ne vaut plus que 6 mA . Calculer alors la tension aux bornes du générateur, aux bornes de la résistance, aux bornes du condensateur ainsi que la charge du condensateur à cette date.
- ③ Au bout d'une dizaine de milliseconde, l'intensité du courant dans le circuit est pratiquement nulle. Justifier le fait que l'intensité du courant est pratiquement nulle en utilisant la constante de temps. Calculer alors la tension aux bornes du générateur, aux bornes de la résistance, aux bornes du condensateur ainsi que la charge du condensateur à cette date.

Exercice 10 Allure des courbes

On utilise un générateur de f.é.m. E et de résistance interne négligeable en série avec une résistance R pour charger un condensateur.

Sachant que la courbe ci-contre représente les variations de la tension aux bornes de la résistance R en fonction du temps, donner l'allure des courbes représentant les variations en fonction du temps de l'intensité du courant et de la tension aux bornes du condensateur.



Exercice 11 Évolution de la charge

On se propose de charger un condensateur soit en le branchant directement aux bornes d'un générateur G_1 de f.é.m. 5 V et de résistance interne 5Ω soit en le branchant directement aux bornes d'un autre générateur G_2 de f.é.m. 10 V et de résistance interne 50Ω .

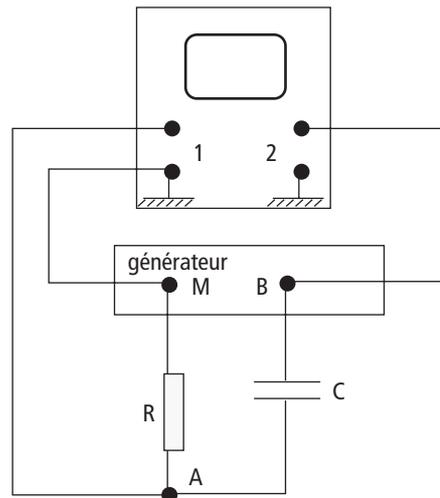
Indiquer pour chacune des propositions ci-dessous si elle est vraie ou fausse :

- 1 Avec G_2 la tension aux bornes du condensateur en fin de charge est deux fois plus grande qu'avec G_1 .
- 2 Avec G_2 la charge finale du condensateur est deux fois plus grande qu'avec G_1 .
- 3 Avec G_2 l'intensité du courant de charge juste au moment où l'on effectue le branchement est dix fois plus faible qu'avec G_1 .
- 4 Avec G_2 le temps de charge est dix fois plus faible qu'avec G_1 .

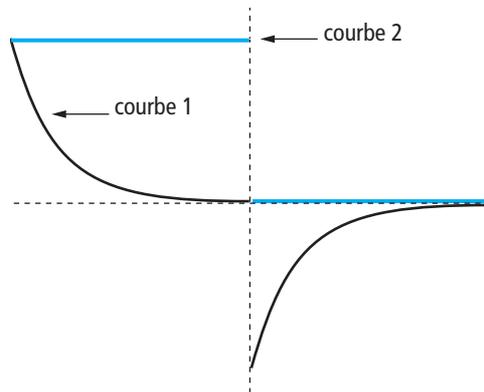
Exercice 12 Charge

On dispose d'un générateur de tension en créneaux qui délivre entre ses bornes B et M une tension U_{BM} périodique égale à 4 V pendant une demi-période et nulle pendant la demi-période suivante.

Ce générateur est relié en série à une résistance R et à un condensateur comme l'indique le schéma ci-dessous. Un oscilloscope permet d'observer simultanément deux tensions respectivement sur la voie 1 et sur la voie 2.



- 1 Préciser quelle tension est observée sur chacune des deux voies.
- 2 Interpréter l'allure de l'oscillogramme représenté ci-dessous.
- 3 Indiquer l'allure de la courbe représentant les variations de la tension U_{BA} aux bornes du condensateur en fonction du temps.



Exercice 13 Équation différentielle de la charge

On charge un condensateur de capacité C à l'aide d'un générateur de f.é.m. E et de résistance négligeable par l'intermédiaire d'une résistance R.

- 1 Établir l'équation différentielle qui permet de déterminer la charge $q(t)$ du condensateur.
- 2 Rechercher la solution de cette équation différentielle sachant qu'elle est de la forme :

$$q(t) = A + Be^{-\frac{t}{RC}}$$

- 3 Données : $E = 10 \text{ V}$, $R = 1\,000 \Omega$; $C = 1 \mu\text{F}$.

Tracer l'allure de $q(t)$ en fonction de t ; on précisera sur le graphique la direction asymptotique, l'échelle de temps en utilisant la constante de temps comme unité.

Exercice 14 Charge et décharge

On considère le circuit de la figure ci-contre.

Données : $E = 5 \text{ V}$; $R = 10 \text{ k}\Omega$;

$C = 100 \text{ nF}$.

1 Charge d'un condensateur à travers une résistance

On s'intéresse à ce qui se passe quand l'interrupteur est en position 1.

a) Appliquer les relations existant entre les grandeurs électriques (intensité et tensions) dans le circuit pour trouver l'équation liant la tension u_{BD} , sa dérivée par rapport au temps et les caractéristiques des composants du circuit (équation différentielle de charge).

On précisera avec soin les conventions et orientations choisies.

Vérifier que : $u_{BD} = E + Ae^{-Bt}$ est solution de l'équation précédente, quelle que soit la valeur de A, si on choisit correctement B.

b) Le condensateur étant préalablement déchargé, on ferme le circuit à l'instant $t = 0$ en basculant l'interrupteur en position 1. Quelle est la valeur à l'instant $t = 0$ de la tension u_{BD} ?

Déterminer complètement l'expression de $u_{BD}(t)$ en fonction du temps et des caractéristiques du circuit.

Qu'appelle-t-on constante de temps τ du circuit ? Que représente τ ? Calculer sa valeur numérique.

c) On dispose d'un oscilloscope permettant d'observer un phénomène qui se produit une fois, c'est-à-dire qui n'est pas répétitif (oscilloscope à mémoire) et qui est branché de manière à visualiser u_{BD} .

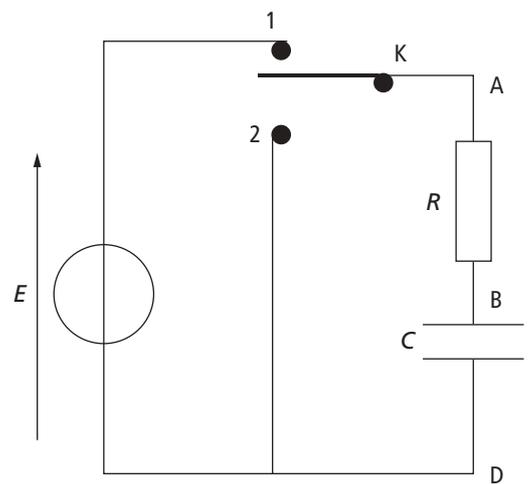
Donner l'allure de la courbe $u_{BD}(t)$ observée sur l'écran de l'oscilloscope.

2 Décharge

Lorsque le condensateur est chargé, à une date choisie comme nouvelle origine des temps, on bascule l'interrupteur en position 2.

Sous quelle forme l'énergie emmagasinée dans le condensateur est-elle dissipée ?

Quelle est sa valeur numérique ?



Chimie

Objectifs

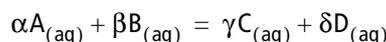
- ▶ Utiliser la relation liant la conductance G aux concentrations molaires effectives $[X_i]$ des ions X_i en solution.
- ▶ En disposant de l'équation d'une réaction, donner l'expression littérale du quotient de réaction Q_r .
- ▶ Savoir que le quotient de réaction dans l'état d'équilibre d'un système, $Q_{r,eq}$, prend une valeur indépendante de la composition initiale qui est la constante d'équilibre associée à l'équation de la réaction.
- ▶ Savoir que, pour une transformation donnée, le taux d'avancement final dépend de la constante d'équilibre et de l'état initial du système.

A Définition

Dans la séquence précédente, nous avons mis en évidence l'existence de l'équilibre chimique.

L'objectif de cette séquence est de montrer que l'on peut caractériser l'état d'équilibre d'un système par une constante appelée **constante d'équilibre**.

Considérons un système chimique subissant une transformation associée à la réaction d'équation générale :



Dans un état donné du système (pression P, température T, concentrations molaires des espèces dissoutes), le quotient de réaction noté Q_r , est défini par :

$$Q_r = \frac{[C]^\gamma \cdot [D]^\delta}{[A]^\alpha \cdot [B]^\beta}$$

Ainsi, si le système est à l'état initial (avant toute transformation), les concentrations des espèces dissoutes A, B, C et D sont les concentrations initiales et notées $[A]_i$, $[B]_i$, $[C]_i$, $[D]_i$.

L'expression du quotient de réaction devient :

$$Q_r = \frac{[C]_i^\gamma \cdot [D]_i^\delta}{[A]_i^\alpha \cdot [B]_i^\beta}$$

Remarques

a) Il est nécessaire de connaître l'état physique des différentes espèces chimiques du système, car dans l'expression de Q_r , n'interviennent que les concentrations molaires des espèces dissoutes (ions, molécules, gaz); par conséquent, toute espèce chimique à l'état solide n'est pas à prendre en compte.

b) De même, la concentration molaire du solvant (l'eau) n'est pas à prendre en compte.

c) Le quotient de réaction est une grandeur sans dimension (sans unité).

Voyons quelques exemples de calculs de quotient de réaction dans ce qui suit :

B Généralisation à divers exemples

- Réaction entre les ions cuivre et hydroxyde :

Dans un bécher, verser 50,0 mL de solution de sulfate de cuivre ($Cu^{2+} + SO_4^{2-}$) de concentration $C = 0,1 \text{ mol} \cdot L^{-1}$. Et y ajouter 50,0 mL de solution d'hydroxyde de sodium ($Na^+ + OH^-$) de concentration $1 \text{ mol} \cdot L^{-1}$.

L'état initial est l'état du système avant toute transformation.

Activité 1

- Calculer la concentration molaire de chaque espèce chimique à l'état initial.
- Écrire l'équation de la réaction associée à la transformation que subit le système lorsque les réactifs sont mis en présence, sachant qu'il se forme un précipité bleu.

Préciser l'état physique des espèces réactives et produites.

- Donner l'expression du quotient de réaction à l'état initial et calculer sa valeur.

- Réaction entre l'acide éthanoïque et l'eau :

Cette réaction est une réaction acido-basique. Les couples acide-base sont : $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{CH}_3\text{COO}^-$ et $\text{H}_3\text{O}^+/\text{H}_2\text{O}$.

On mélange $1,0 \cdot 10^{-2}$ mol d'acide éthanoïque dans une quantité d'eau telle que l'on obtient 1 L de solution.

Activité 2

a) Calculer la concentration molaire de chaque espèce chimique à l'état initial.

b) Écrire l'équation de la réaction associée à la transformation que subit le système lorsque les réactifs sont mis en présence.

Préciser l'état physique des espèces réactives et produites.

Le pH de la solution d'acide éthanoïque précédente est de 3,4.

Activité 3

a) Calculer la concentration des espèces chimiques dissoutes à l'état final.

b) En déduire la valeur du quotient de réaction à l'état final.

Dans ce dernier exemple de réaction (abordé lors de la séquence précédente), l'état final correspond à l'état d'équilibre du système.

Voyons alors quelle caractéristique présente cet état particulier pour un système chimique.

L'étude sera faite sur l'exemple de la réaction de dissolution de l'acide éthanóique dans l'eau, et ce, pour plusieurs concentrations d'acide introduit différentes.

Activité 4

- Écrire l'équation de la réaction associée à la transformation s'effectuant dans chaque système.
- Que peut-on dire des concentrations des ions éthanoate et hydronium à un instant t donné ?
- En déduire l'expression de la conductivité σ de la solution en fonction de cette concentration (notée C).

Mesurons la conductance G (exprimée en millisiemens mS) de solutions d'acide éthanóique de concentration molaire introduite C_0 en acide; nous obtenons les résultats :

C_0 (mol · L ⁻¹)	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
G (mS)	0,150	0,105	0,058	0,045	0,030	0,015
σ (mS · m ⁻¹)						
C mmol · L ⁻¹						
[CH ₃ COOH] mmol · L ⁻¹						
$Q_{r,eq}$						



Attention

Ne pas confondre C_0 : la concentration en acide éthanóique (introduit à l'état initial) et C : la concentration des ions CH₃COO⁻ et H₃O⁺ à l'état final (état d'équilibre).

De la conductance G , on peut calculer la conductivité σ de la solution à partir de la relation (vue en classe de 1^{re}) :

$$\sigma = K_{\text{cell}} \cdot G$$

K_{cell} : constante appelée constante de cellule et égale à : $\frac{\ell}{s}$ avec ℓ distance (m) entre les électrodes et s : surface (m²) des électrodes.

La valeur de la constante de cellule du conductimètre utilisé ici est d'environ 112,2 m⁻¹.

Activité 5

Calculer les valeurs de σ correspondantes à celles de G et remplir la 3^e ligne du tableau précédent.

La conductivité σ d'une solution contenant des ions portant une seule charge, dépend de la concentration de ces ions dans la solution selon la relation :

$$\sigma = \sum_i \lambda_i \cdot [X_i]$$

ainsi, pour une solution électrolytique du type : M⁺_(aq) + X⁻_(aq) dans lesquelles : [X⁻] = [M⁺] = C , la relation s'écrit alors :

$$\sigma = \lambda_{M^+} \cdot [M^+] + \lambda_{X^-} \cdot [X^-] = (\lambda_{M^+} + \lambda_{X^-}) \cdot C$$

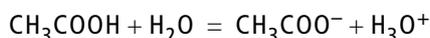
La valeur des conductivités molaires ioniques des ions (en mS · m² · mol⁻¹) : $\lambda_{\text{CH}_3\text{COO}^-} = 4,1$ et $\lambda_{\text{H}_3\text{O}^+} = 35,0$.

Activité 6 a) Calculer les valeurs de C correspondantes à celles de σ et remplir la 4^e ligne du tableau précédent.
 Attention : la concentration C trouvée s'exprime en $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$;
 or : $1 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3} = 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

b) En déduire les valeurs de la concentration $[\text{CH}_3\text{COOH}]$ (acide éthanique dissous) et remplir la 5^e ligne.

Attention : $[\text{CH}_3\text{COOH}]_{\text{dissout}} = [\text{CH}_3\text{COOH}]_{\text{introduit}} - [\text{CH}_3\text{COOH}]_{\text{ayant réagi}} = C_0 - C$

Pour l'équation de réaction :



L'expression de la constante de réaction Q_r est :

$$Q_r = \frac{[\text{CH}_3\text{COO}^-] \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{CH}_3\text{COOH}]}$$

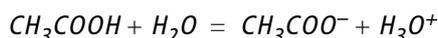
La concentration de l'eau (solvant) n'apparaît pas dans cette expression.

Activité 7 a) Calculer la valeur du quotient de réaction à l'état final pour chaque solution du tableau, soit : $Q_{r,\text{eq}}$ et remplir la 6^e ligne du tableau.

b) Comparer les valeurs de $Q_{r,\text{eq}}$ obtenues.

Le quotient de réaction, dans l'état d'équilibre d'un système, $Q_{r,\text{eq}}$, prend **une** valeur indépendante de la composition initiale de ce système. Cette constante est appelée **constante d'équilibre K** associée à l'équation de réaction, à une température donnée.

Remarque Une constante d'équilibre caractérise une équation de réaction donnée et ne dépend que de la température. Ainsi, l'équation de la réaction :



est caractérisée par sa constante d'équilibre K qui est égale à : $1,9 \cdot 10^{-5}$ (valeur exacte : $1,6 \cdot 10^{-5}$) valeur obtenue à une température de 25 °C.

A Influence de l'état initial du système

Reprenons le tableau précédent pour lequel nous allons calculer le taux d'avancement final de la réaction pour **1 litre** de solution d'acide éthanóique à différentes concentrations :

C_0 (mol · L ⁻¹)	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
C (10 ⁻³ mol · L ⁻¹)					
Avancement final X_{final} (10 ⁻³ mol)					
Taux d'avancement final τ					

- Activité 8**
- Compléter les cases vides du tableau.
 - Le taux d'avancement τ de la réaction est-il constant ? Conclusion ?

B Influence de la constante d'équilibre

Toujours à partir de mesures conductimétriques, évaluons l'influence de la constante d'équilibre sur la valeur du taux d'avancement final τ .

Pour cela, mesurons avec le même conductimètre que précédemment ($K_{\text{cell}} = 112,2 \text{ m}^{-1}$), la conductance G de différents acides faibles de **même concentration : $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$** :

Nom de l'acide	Acide éthanóique CH ₃ COOH	Acide méthanoíque HCOOH	Acide benzoíque C ₆ H ₅ COOH
Constante d'équilibre K à 25 °C	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-5}$
Conductance G (mS)	0,15	0,50	0,27
Conductivité T (mS · m ⁻¹)			
Avancement final X_{final} (mol)			
Taux d'avancement final τ			

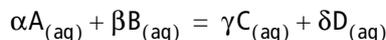
La valeur des conductivités molaires ioniques des ions (en $\text{mS} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$) : $\lambda_{\text{HCOO}^-} = 6,0$; $\lambda_{\text{C}_6\text{H}_5\text{COO}^-} = 3,2$; et $\lambda_{\text{H}_3\text{O}^+} = 35,0$.

- Activité 9**
- Compléter les cases vides du tableau.
 - Le taux d'avancement τ de la réaction est-il constant ? Conclusion ?

Nous préciserons ces résultats dans la prochaine séquence.

Résumé

Considérons un système chimique subissant une transformation associée à la réaction d'équation générale :



Dans un état donné du système (pression P, température T, concentrations molaires des espèces dissoutes), le quotient de réaction noté Q_r , est défini par :

$$Q_r = \frac{[C]^\gamma \cdot [D]^\delta}{[A]^\alpha \cdot [B]^\beta}$$

Il est nécessaire de connaître l'état physique des différentes espèces chimiques du système, car dans l'expression de Q_r , n'interviennent que les concentrations molaires des **espèces dissoutes** (ions, molécules, gaz); par conséquent, **toute espèce chimique à l'état solide n'est pas à prendre en compte**.

De même, la concentration molaire du **solvant (l'eau) n'est pas à prendre en compte**.

Le quotient de réaction est une grandeur sans dimension (sans unité).

Le quotient de réaction, dans l'état d'équilibre d'un système, prend une valeur indépendante de la composition du système, qui est notée **K** et appelée **constante d'équilibre**. La constante d'équilibre associée à l'équation d'une réaction ne dépend que de la température.

Pour une transformation donnée, le taux d'avancement final d'une réaction dépend de la :

- Constante d'équilibre
- Composition initiale du système

Exercices

Exercices d'applications

Exercice 1 Comparaison des conductivités des solutions

La mesure de la conductivité des solutions aqueuses suivantes (toutes de concentration $5,0 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$), a donné les résultats :

Solutions	Chlorure de sodium	Acide chlorhydrique	Chlorure de potassium	Hydroxyde de sodium
Conductivité σ ($\text{mS} \cdot \text{m}^{-1}$)	60,0	222,0	71,5	121,5

- 1 Classer ces solutions par conductivité croissante.
- 2 Quels types d'ions sont contenus dans chaque solution ?
- 3 Classer alors ces ions par conductivité molaire croissante.

Exercice 2 Constante d'équilibre

Calculer la constante d'équilibre associée aux équations des réactions des acides suivants sur l'eau :

- a) Solution d'acide méthanoïque de concentration $5 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ de $\text{pH} = 3,1$.
- b) Solution d'acide borique H_3BO_3 de concentration $3 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ de $\text{pH} = 5,4$.
- c) Solution d'acide ascorbique $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ de concentration $5 \cdot 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ de $\text{pH} = 3,7$.

Exercices type bac

Exercice 3 Conductance d'une solution d'acide méthanoïque

On réalise la dissolution de l'acide méthanoïque dans l'eau, et ce, pour plusieurs concentrations d'acide différentes.

- 1 Écrire l'équation de la réaction associée à la transformation s'effectuant dans chaque système et en déduire l'expression de sa constante d'équilibre K .
- 2 Écrire l'expression de la conductivité σ de la solution en fonction de la concentration C en ions dissous.

La mesure de la conductance G (exprimée en millisiemens : mS) des solutions d'acide méthanoïque de concentration molaire introduite C_0 en acide ; nous donne le tableau :

$C_0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
G (mS)	0,46	0,32	0,18	0,12
σ ($\text{mS} \cdot \text{m}^{-1}$)				
C ($10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)				
$[\text{HCOOH}]$ ($10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)				
K				

- 3 Remplir le tableau et déterminer la valeur de la constante d'équilibre de la réaction de l'acide méthanoïque sur l'eau.

Note : la valeur de la constante de cellule du conductimètre utilisé est de 112 m^{-1} .

La valeur des conductivités molaires ioniques des ions (en $\text{mS} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$) : $\lambda_{\text{HCOO}^-} = 6,0$ et $\lambda_{\text{H}_3\text{O}^+} = 35,0$.

Exercice 4 Étude d'une solution d'acide salicylique

Soit des solutions d'acide salicylique $\text{C}_6\text{H}_4\text{OHCOOH}$ de concentration C_0 .

❶ Écrire l'équation de la réaction associée à la transformation s'effectuant dans chaque système lors de la dissolution de l'acide dans l'eau..

Solutions	$C_0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	pH
S_1	$5,0 \cdot 10^{-2}$	2,2
S_2	$1,0 \cdot 10^{-2}$	2,5
S_3	$5,0 \cdot 10^{-3}$	2,7
S_4	$1,0 \cdot 10^{-3}$	3,25
S_5	$1,0 \cdot 10^{-4}$	4,1
S_6	$1,0 \cdot 10^{-5}$	5,05

❷ Les valeurs du pH sont données dans le tableau. Calculer, pour chaque couple (C_0 , pH), la valeur de la constante d'équilibre K .

❸ Prévoir comment évolue le taux d'avancement final de la réaction lorsque la concentration C_0 de l'acide diminue. ■

Séquence

5

> **Physique :**

Évolution d'un système électrique contenant une bobine

> **Chimie :**

Réactions acido-basiques

Physique > Évolution d'un système électrique contenant une bobine

Chapitre 1	>	La bobine	149
		A Description	
		B Tension aux bornes d'une bobine	
Chapitre 2	>	Cas du dipôle RL	151
		A Réponse en courant d'une bobine à un échelon de tension	
		B Énergie emmagasinée dans une bobine	
		C Continuité de l'intensité dans un circuit contenant une bobine	
Chapitre 3	>	Oscillations libres dans un circuit RLC serie	159
		A Décharge oscillante d'un condensateur dans une bobine	
		B Influence de l'amortissement	
		C Interprétation énergétique	
		D Résolution analytique dans le cas d'un amortissement négligeable	
		E Entretien des oscillations	
Résumé	>	.....	163
Exercices	>	.....	164

Chimie > Réactions acido-basiques

Chapitre 1	>	Autoprotolyse de l'eau	171
Chapitre 2	>	Échelle de pH	172
Chapitre 3	>	Constante d'acidité	173
Chapitre 4	>	Réaction acide-base	174
Chapitre 5	>	Zone de virage d'un indicateur coloré	175
Chapitre 6	>	Diagramme de prédominance et diagramme de distribution	176
Chapitre 7	>	Détermination du pK_A d'un indicateur coloré par spectrophotométrie	178
Chapitre 8	>	Tirage ph métrique	181
Résumé	>	.....	185
Exercices	>	.....	187

Physique

Objectifs

- ▶ Connaître la représentation symbolique d'une bobine. Connaître l'expression de la tension à ses bornes.
- ▶ Connaître l'expression de la constante de temps et savoir vérifier son unité par analyse dimensionnelle.
- ▶ Connaître l'expression de l'énergie emmagasinée.
- ▶ Savoir qu'une bobine s'oppose aux variations du courant du circuit où elle se trouve et que l'intensité de ce courant ne subit pas de discontinuité.
- ▶ Savoir exploiter un document expérimental concernant l'établissement du courant.
- ▶ Savoir tracer l'allure de la tension aux bornes du condensateur en fonction du temps pour les régimes périodique, pseudo-périodique et apériodique.
- ▶ Connaître l'expression de la période propre, la signification de chacun des termes et leur unité.
- ▶ Savoir exploiter un document expérimental correspondant à la décharge oscillante d'un condensateur dans une bobine.

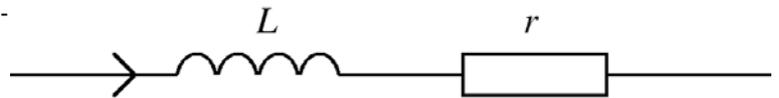
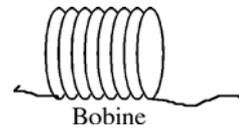
A Description

Une bobine correspond à l'enroulement d'un fil conducteur autour d'un cylindre.

Cette bobine est caractérisée par la grandeur L appelée inductance de la bobine et par la résistance r du fil.

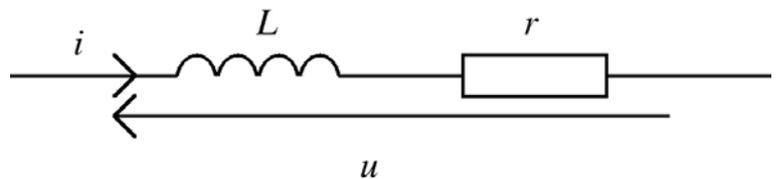
La valeur de l'inductance de la bobine augmente si l'on introduit un noyau de fer doux dans la bobine.

Représentation symbolique d'une bobine :



B Tension aux bornes d'une bobine

En convention récepteur, la flèche-tension représentant la tension aux bornes de la bobine est de sens opposé au sens du courant.



Dans cette convention, la tension u aux bornes d'une bobine (sans noyau de fer doux) placée dans un circuit parcouru par un courant i est de la forme : $u = ri + L \frac{di}{dt}$.

La grandeur L est l'inductance de la bobine ; elle s'exprime en Henry (H).

$$u = ri + L \frac{di}{dt}$$

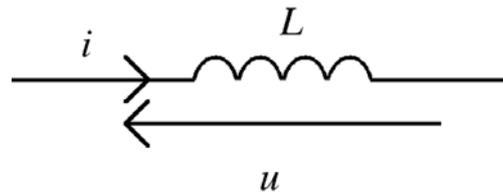
Unités : u (V), r (Ω), i (A), L (H), $\frac{di}{dt}$ (A/s)

Activité 1

Lorsque l'intensité est constante dans un circuit, que peut-on dire de la tension u ?

À quoi la bobine est-elle alors équivalente ?

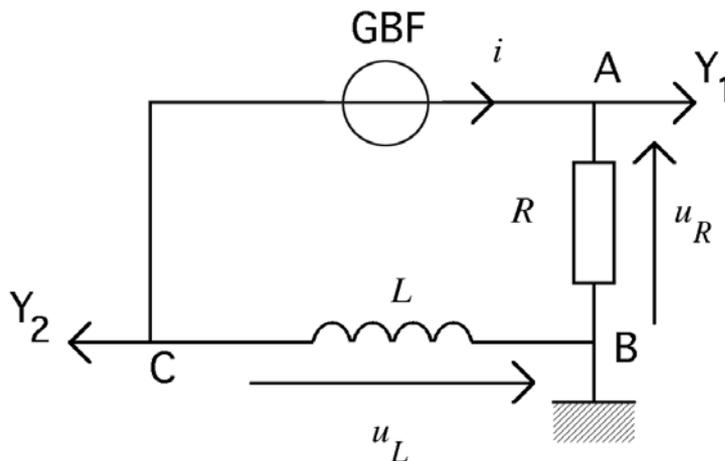
Cas où la résistance de la bobine est négligeable :



la tension u aux bornes de la bobine parcouru par un courant i s'écrit alors : $u = L \frac{di}{dt}$.

Activité 2

On considère le circuit ci-dessous constitué : d'un générateur basse fréquence (GBF), d'une résistance de valeur R , d'une bobine d'inductance L (sa résistance de valeur r est négligeable dans ce circuit).



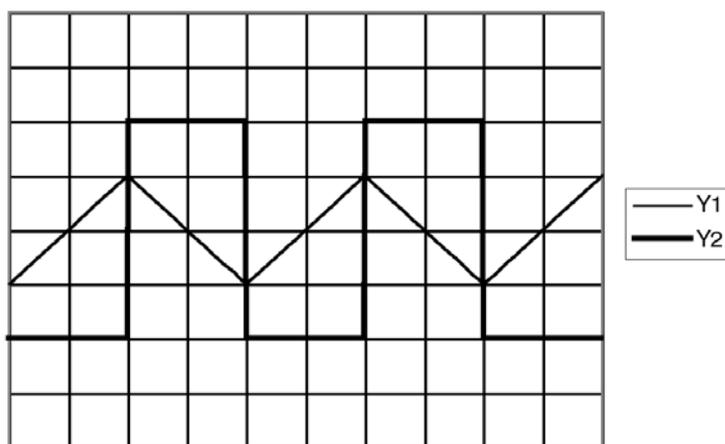
Un oscillographe est branché sur ce circuit.

Le GBF délivre une tension périodique triangulaire.

Données : $R = 10\text{ k}\Omega$; sensibilités de l'oscillographe : voie 1 : $2\text{ V} \cdot \text{div}^{-1}$, voie 2 : $50\text{ mV} \cdot \text{div}^{-1}$;

base de temps : $1\text{ ms} \cdot \text{div}^{-1}$.

On obtient sur l'oscillographe les courbes suivantes :

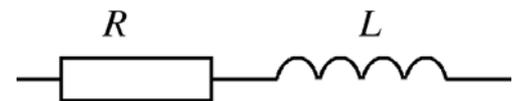


❶ D'après les branchements figurant sur le schéma, quelles sont les grandeurs physiques qui sont visualisées sur l'écran de l'oscillographe ?

❷ Vérifier que la forme de la tension u_L aux bornes de la bobine correspond bien à $L \frac{di}{dt}$.

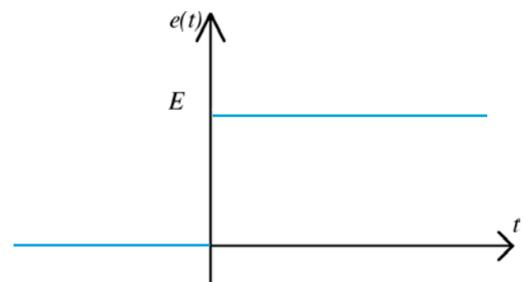
A Réponse en courant d'une bobine à un échelon de tension

Le dipôle RL est un dipôle comprenant en série un conducteur ohmique de résistance R et une bobine d'inductance L .



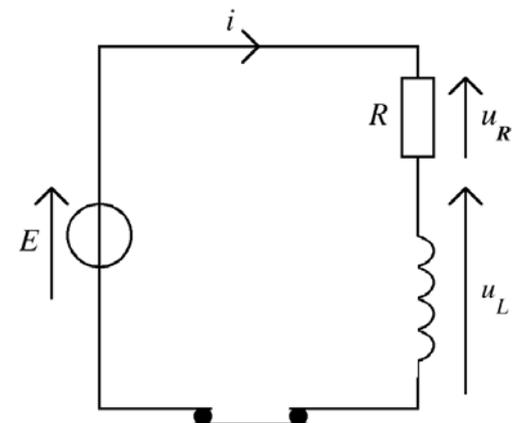
Un échelon de tension correspond à une tension $e(t)$ aux bornes du générateur qui vérifie :

- ▶ $e(t) = 0$ pour $t < 0$;
- ▶ $e(t) = E$ pour $t \geq 0$.



Pratiquement, on réalise un échelon de tension en utilisant le montage suivant ; à l'instant $t = 0$, on ferme l'interrupteur ; le circuit est alors alimenté par une source idéale de tension $e(t) = E$.

La réponse en courant de la bobine à l'excitation $e(t) = E$ correspond à l'évolution de l'intensité $i(t)$.

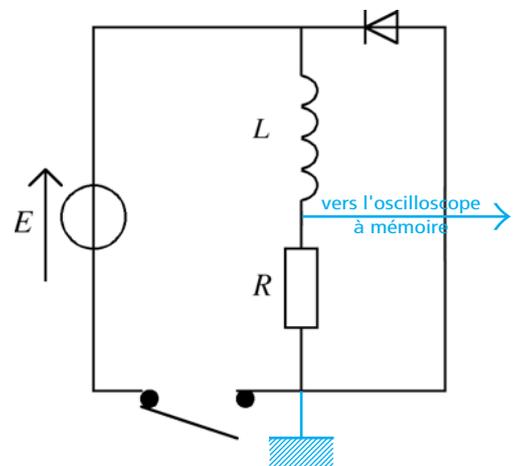


1 Étude expérimentale

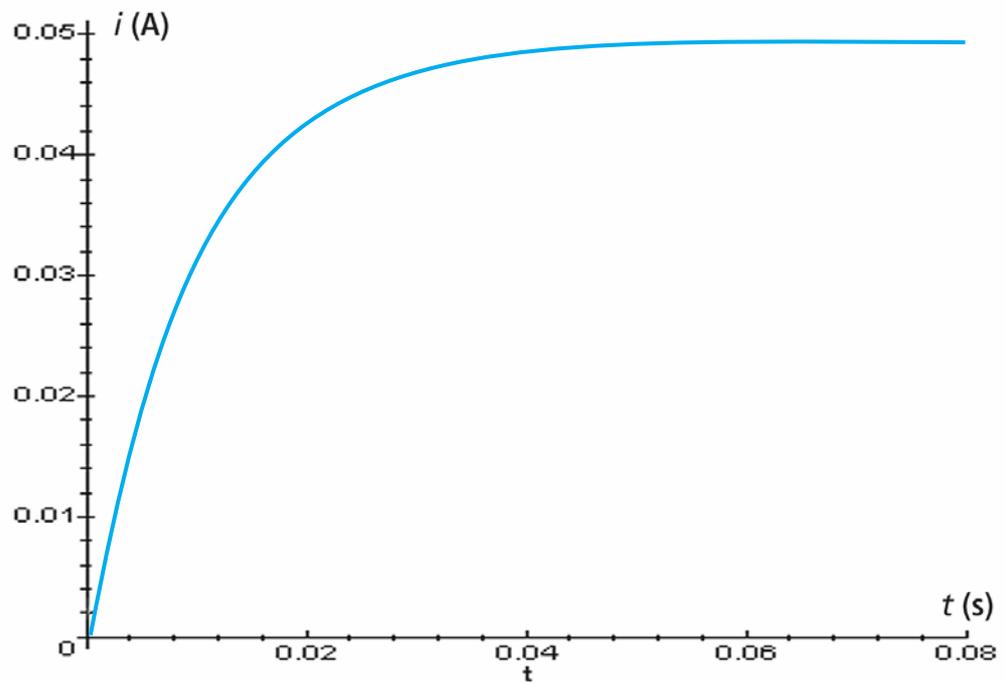
Activité 3 On associe en série une bobine (d'inductance L et de résistance r négligeable), un conducteur ohmique de résistance R un générateur idéal de tension de f.é.m E .

$$R = 100 \Omega ; E = 5,0 V ; L = 1,0 H$$

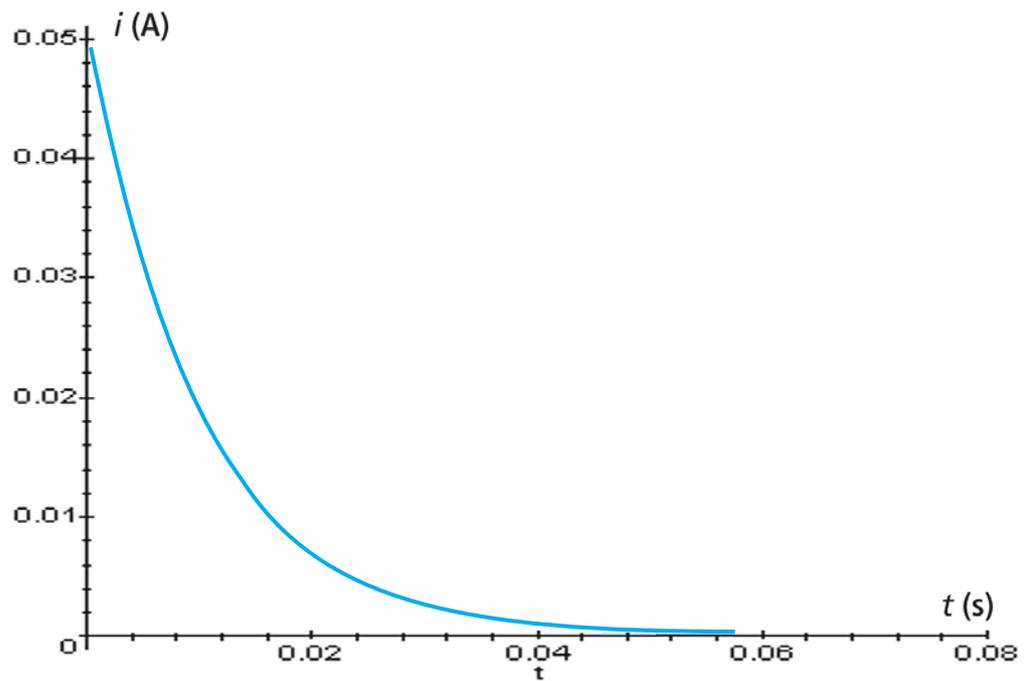
Un oscilloscope à mémoire permet d'enregistrer l'évolution au cours du temps de l'intensité de courant dans le circuit.



- ❶ On ferme l'interrupteur ; on obtient la courbe ci-dessous. Commenter cette courbe.
Que peut-on dire de l'établissement du courant dans un circuit contenant une bobine ?



- ❷ L'intensité dans le circuit étant égale à 0,05 A, on ouvre l'interrupteur ; on obtient la courbe ci-dessous. Commenter la courbe obtenue.



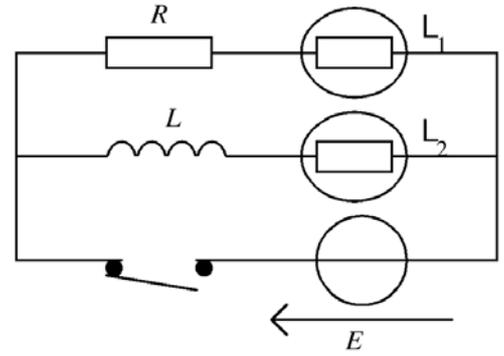
Activité 4

Dans cette expérience, on étudie l'établissement du courant dans deux branches en dérivation alimentées par un générateur de courant continu.

On compare visuellement l'établissement du courant dans les deux branches en utilisant l'éclairement des lampes L_1 et L_2 .

Qu'observera-t-on ?

Si à la place de la bobine, on plaçait un condensateur, qu'observerait-on ?



2 Étude théorique

On considère un circuit comprenant une bobine de résistance négligeable et d'inductance L associée en série avec un conducteur ohmique de résistance R et une alimentation stabilisée de f.é.m E constante.

Nous supposons qu'initialement la bobine n'est parcourue par aucun courant. À l'instant $t = 0$, on ferme l'interrupteur.

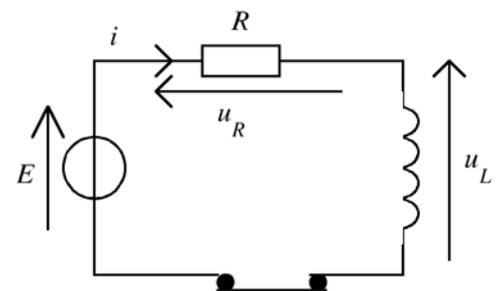
Recherchons la réponse en $i(t)$.

En appliquant la loi des mailles, nous obtenons :

$$u_R + u_L - E = 0$$

Ce qui s'écrit : $Ri + L \frac{di}{dt} = E$

Nous obtenons l'équation différentielle suivante : $\frac{di}{dt} + \frac{R}{L} i = \frac{E}{L}$.



Nous admettrons que la solution de cette équation différentielle s'écrit : $i = Ae^{-\frac{t}{\left(\frac{L}{R}\right)}} + B$.

Activité 5

Montrer que le terme $\frac{L}{R}$ a la dimension d'un temps ; nous poserons : $\tau = \frac{L}{R}$.

Lorsque t tend vers l'infini, l'intensité $i(t)$ est constante et égale à $\frac{E}{R}$: $B = \frac{E}{R}$;

La solution de cette équation différentielle s'écrit : $i(t) = \frac{E}{R} + Ae^{-\frac{t}{\tau}}$ avec : $\tau = \frac{L}{R}$.

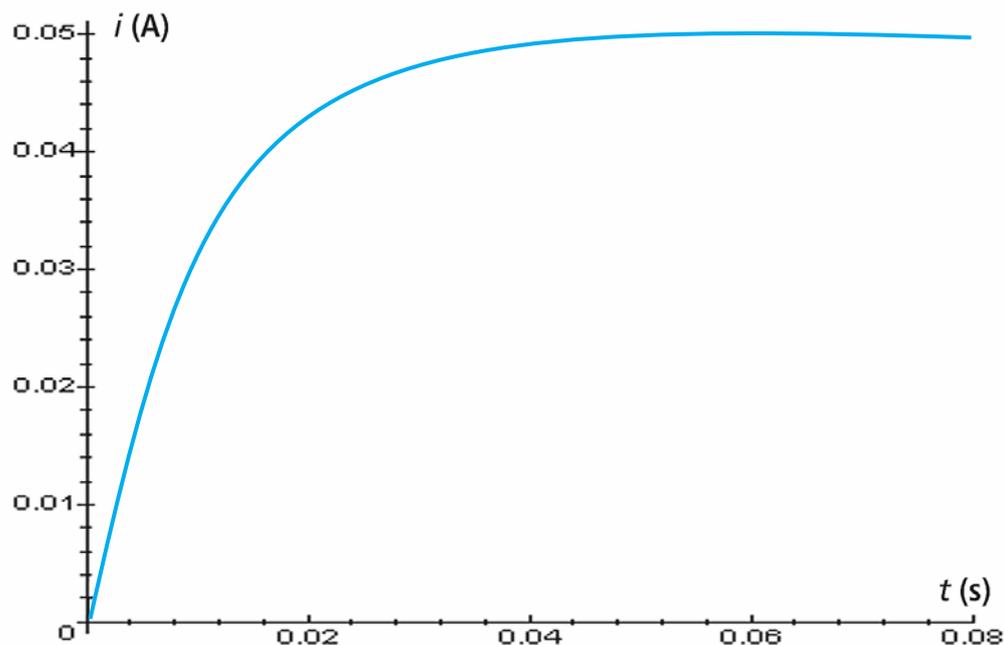
La constante A est déterminée par les conditions initiales : à $t = 0$, $i(0) = 0$ d'où :

$$i(0) = \frac{E}{R} + A = 0 \Rightarrow A = -\frac{E}{R}.$$

On en déduit :
$$i = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

Plus τ est grand, plus le courant est long à s'établir dans le circuit.

Activité 6 On reprend la courbe correspondant à l'établissement du courant de l'activité 4.



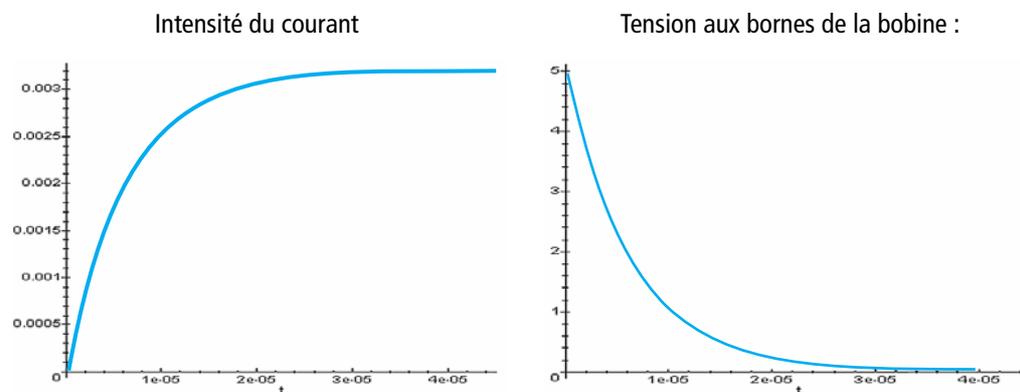
Déterminer graphiquement la constante de temps du circuit en utilisant la tangente à l'origine.

La tension aux bornes de la bobine est donnée par la relation : $u_L = L \frac{di}{dt} \Rightarrow u_L = E e^{-\frac{t}{\tau}}$.

Rappel :

La dérivée par rapport au temps de e^{-at} vaut $-ae^{-at}$.

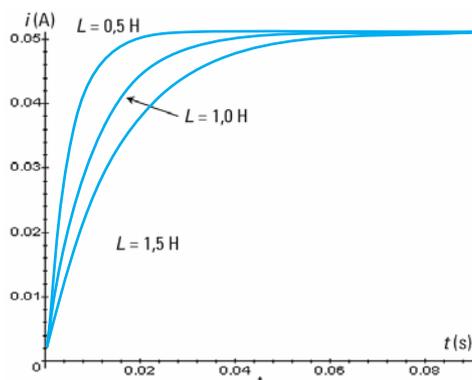
L'allure des courbes est donnée ci-dessous :



Activité 7

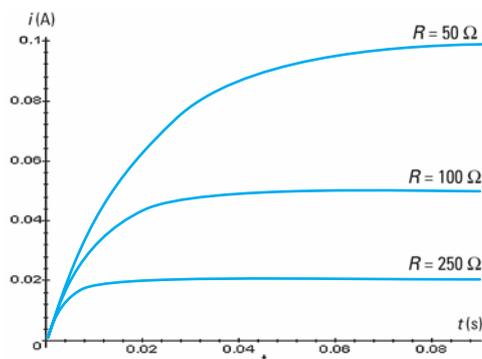
On s'intéresse à l'établissement du courant de l'activité 4 et on étudie l'influence de L , E et R .

- 1 On modifie l'inductance L ; on obtient les trois courbes suivantes.



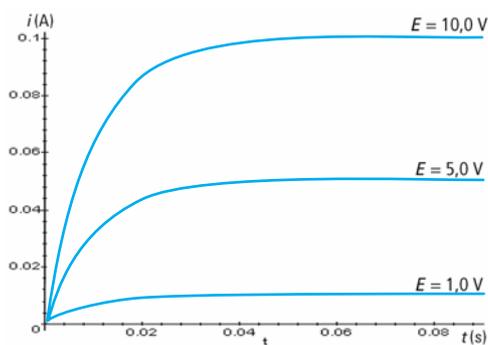
Quelle est l'influence de l'inductance sur le retard à l'établissement du courant dans un circuit et sur l'intensité du courant en régime permanent ?

- 2 On modifie la résistance R ; on obtient les trois courbes suivantes.



Quelle est l'influence de la résistance R sur le retard à l'établissement du courant dans un circuit et sur l'intensité du courant en régime permanent ?

- 3 On modifie l'amplitude E de l'échelon de tension ; on obtient les trois courbes suivantes.



Quelle est l'influence de E sur le retard à l'établissement du courant dans un circuit et sur l'intensité du courant en régime permanent ?

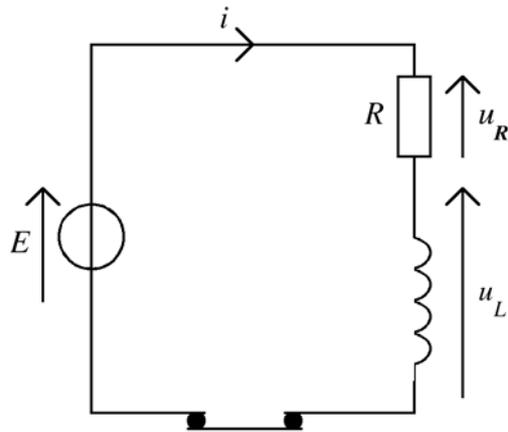
B

Énergie emmagasinée dans une bobine

Si l'on ouvre l'interrupteur du circuit ci-contre une étincelle apparaît aux bornes de l'interrupteur.

Ce phénomène apparaît dès que l'on débranche un appareil ménager comportant un moteur donc des bobines.

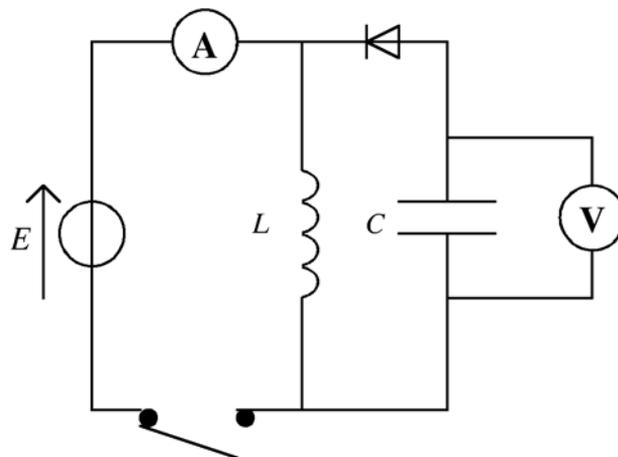
On peut éviter ce phénomène en plaçant une diode ou un condensateur comme dans l'activité suivante.

**Activité 8**

On ferme l'interrupteur, le condensateur étant initialement déchargé.

Après une durée suffisamment longue, un courant permanent d'intensité I s'établit dans le circuit comprenant le générateur et la bobine.

La diode, placée en inverse, empêche la circulation du courant dans la maille de droite.



On ouvre l'interrupteur ; une tension apparaît aux bornes du condensateur ; le condensateur se charge donc, alors que le générateur ne fait plus partie du circuit.

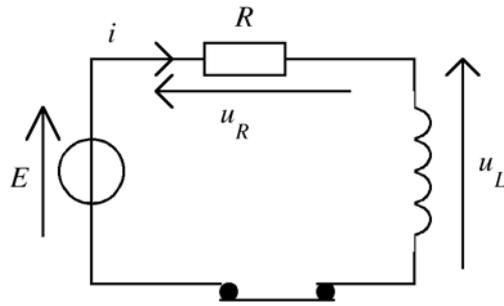
- ❶ Quelle était l'énergie du condensateur avant que l'interrupteur ne soit ouvert ?
- ❷ Cette énergie augmente-t-elle au cours de l'expérience ?
- ❸ D'où provient cette énergie ?

Nous admettons que l'énergie W emmagasinée par une bobine d'inductance L , parcourue par un courant d'intensité i , est donnée par la relation : $W = \frac{1}{2} Li^2$.

W s'exprime en joule (J) ; L en Henry (H) et i en ampère (A).

Activité 9 Reprenons le circuit comprenant une bobine de résistance négligeable et d'inductance L associée en série avec un conducteur ohmique de résistance R et une alimentation stabilisée de f.é.m E constante.

En appliquant la loi des mailles, nous avons obtenu la relation $E = Ri + L \frac{di}{dt}$.



Multiplier cette relation par $(i dt)$ et montrer que l'énergie fournie par le générateur est transformée :

- ▶ par effet Joule en énergie thermique dans la résistance
- ▶ et emmagasinée dans la bobine.

C Continuité de l'intensité du courant dans un circuit qui contient une bobine

Une bobine s'oppose aux variations du courant du circuit où elle se trouve.

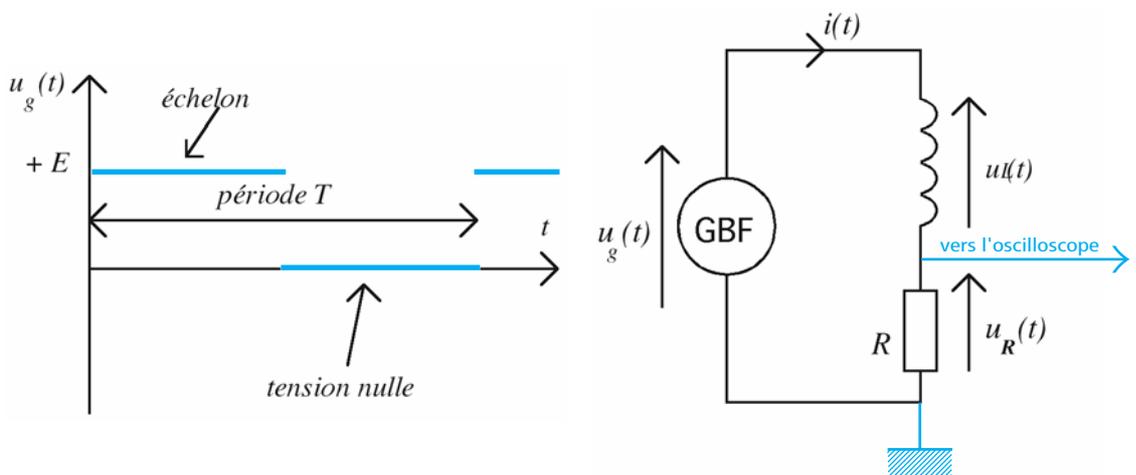
Le stockage et le déstockage de l'énergie ne peut jamais s'effectuer instantanément.

Par conséquent, l'intensité du courant dans un circuit contenant une bobine ne subit pas de discontinuité.

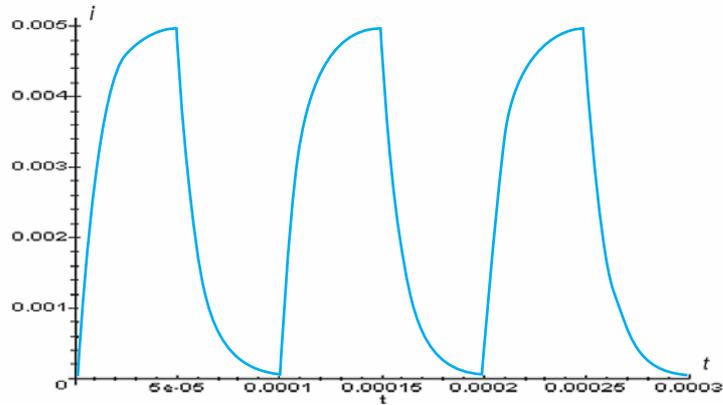
Activité 10 On étudie la réponse en courant $i(t)$ à un échelon de tension puis la disparition de ce courant en utilisant un oscilloscope à mémoire.

Pour réaliser un montage équivalent au précédent sans avoir à modifier la position de l'interrupteur, on utilise un générateur basses fréquences (GBF), un conducteur ohmique de résistance R , une bobine d'inductance L ; la tension aux bornes du générateur est représentée ci-dessous de même que le circuit ainsi que les branchements.

$R = 1 \text{ k}\Omega$; $E = 5,0 \text{ V}$; $L = 10 \text{ mH}$.



- 1 Comment doit-on choisir, en fonction de la constante de temps τ du circuit, la période T du générateur pour que l'on puisse observer l'établissement complet et la disparition complète du courant sur une période ?
- 2 Grâce à l'oscilloscope, on obtient l'oscillogramme de la figure ci-dessous.



Peut-on dire à partir de cet enregistrement que l'intensité du courant dans un circuit contenant une bobine ne subit pas de discontinuité ?

Sur le graphique, quelles sont les unités utilisées pour l'intensité $i(t)$ et pour le temps t ?

Nous avons vu qu'un condensateur peut stocker de l'énergie ; de même une bobine emmagasine de l'énergie qu'elle peut restituer dans le circuit.

Que se passe-t-il si l'on place en série dans un circuit un condensateur qui a stocké de l'énergie et une bobine susceptible d'emmagasiner cette énergie ?

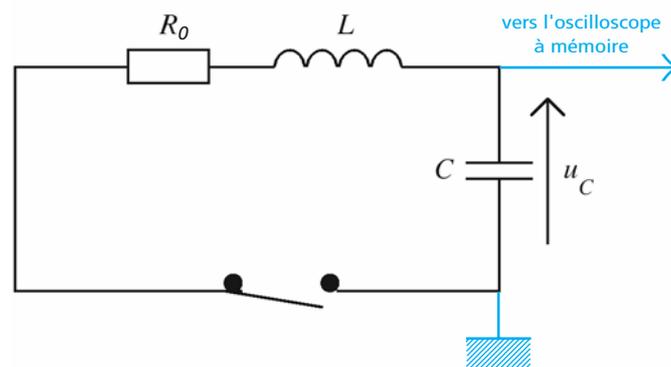
A Décharge oscillante d'un condensateur dans une bobine

Considérons le circuit RLC suivant constitué d'un conducteur ohmique (de résistance R_0), d'une bobine (de résistance r et d'inductance L) et d'un condensateur (de capacité C).

On pose : $R = R_0 + r$.

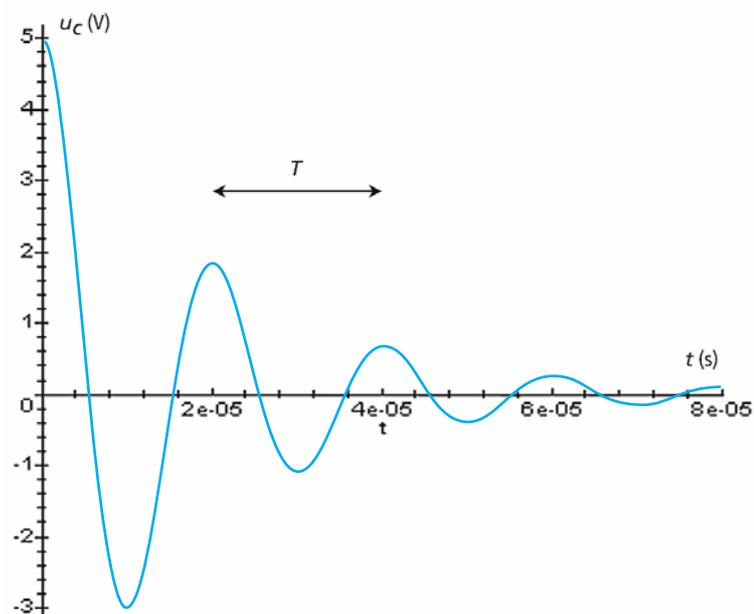
$$R = R_0 + r = 1 \text{ k}\Omega ; \quad C = 1 \text{ nF} ; \quad L = 10 \text{ mH} .$$

Un oscilloscope à mémoire permet d'enregistrer l'évolution au cours du temps de la tension u_C aux bornes du condensateur.



Nous supposons qu'initialement le condensateur est chargé : $u_C(0) = 5 \text{ V}$.

Fermes l'interrupteur. Nous obtenons la courbe suivante.



La tension aux bornes du condensateur prend des valeurs alternativement positives et négatives ; on dit que la décharge du condensateur est oscillante.

Le système constitué par le circuit électrique est le siège d'oscillations électriques.

On dit que le régime est pseudopériodique de pseudo-période T .

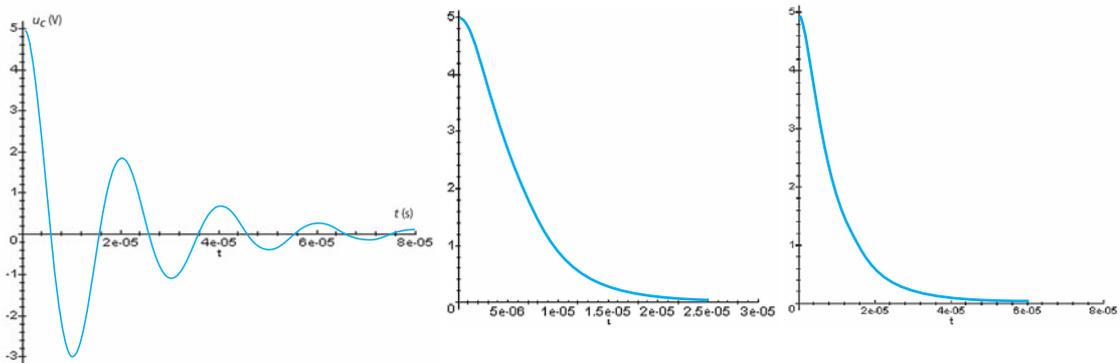
Activité 11 Calculer la pseudo-période T sur le graphique ci-dessus.

B Influence de l'amortissement

L'amortissement des oscillations dépend de la résistance du circuit.

On augmente la résistance R du circuit précédent ; à partir de la valeur $R_C = 6\,325\ \Omega$, il n'y a plus d'oscillations ; la tension s'annule rapidement.

Pour $R > R_C$, la tension tend lentement vers 0.



C Interprétation énergétique

Reprenons le circuit du paragraphe (2.1).

En appliquant la loi des mailles, nous obtenons :

$$u_R + u_L + u_C = 0$$

soit : $Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{q}{C} = 0$ avec $i = \frac{dq}{dt}$.

Multiplions cette relation par $(i dt)$:

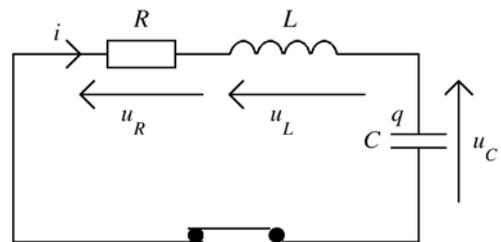
$$Ri(i dt) + L \frac{di}{dt} (i dt) + \frac{q}{C} (i dt) = 0$$

$$\Rightarrow Ri^2 dt + Li di + \frac{q}{C} dq = 0 \Rightarrow Ri^2 dt + d\left(\frac{1}{2} Li^2\right) + d\left(\frac{1}{2} \frac{q^2}{C}\right) \Rightarrow d\left(\frac{1}{2} Li^2 + \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}\right) = -Ri^2 dt.$$

Initialement toute l'énergie est stockée dans le condensateur. Quand le condensateur se décharge, il y a transfert d'énergie vers la bobine qui la stocke à nouveau. La bobine transfère cette énergie au condensateur et ainsi de suite.

Il y a échange entre l'énergie électrique du condensateur et l'énergie magnétique de la bobine.

Cette énergie $\frac{1}{2} Li^2 + \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}$ est progressivement dissipée par transfert thermique au niveau de la résistance (effet Joule) $- Ri^2 dt$.



D Résolution analytique dans le cas d'un amortissement négligeable

On considère le circuit précédent mais avec une résistance négligeable. Le condensateur est chargé.

Écrivons la loi des mailles : $u_L + u_C = 0 \Rightarrow L \frac{di}{dt} + \frac{q}{C} = 0$

avec $i = \frac{dq}{dt}$.

Nous obtenons donc l'équation différentielle suivante :

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{1}{LC} q = 0.$$

On pose : $\omega_0^2 = \frac{1}{LC} \Rightarrow \frac{d^2q}{dt^2} + \omega_0^2 q = 0.$

La solution de cette équation différentielle est de la forme : $q = Q_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$; Q_m et φ sont déterminés par les conditions initiales.

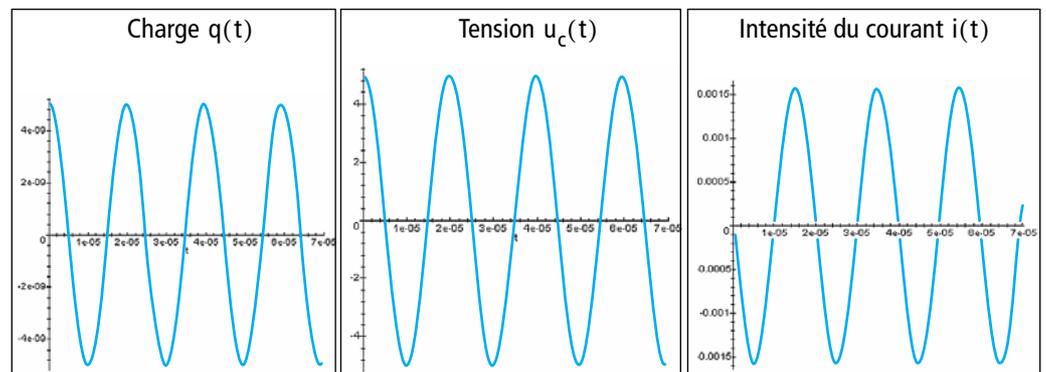
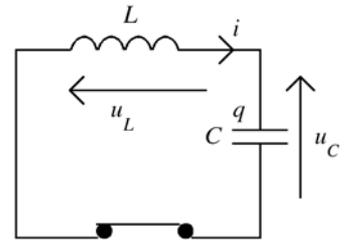
La charge q est sinusoïdale de période : $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}$; T_0 est appelée période propre du circuit LC.

La tension aux bornes du condensateur s'écrit :

$$u_C = \frac{q}{C} = \frac{Q_m}{C} \cos(\omega_0 t + \varphi) = (U_C)_m \cos(\omega_0 t + \varphi).$$

L'intensité du courant dans le circuit est donnée par :

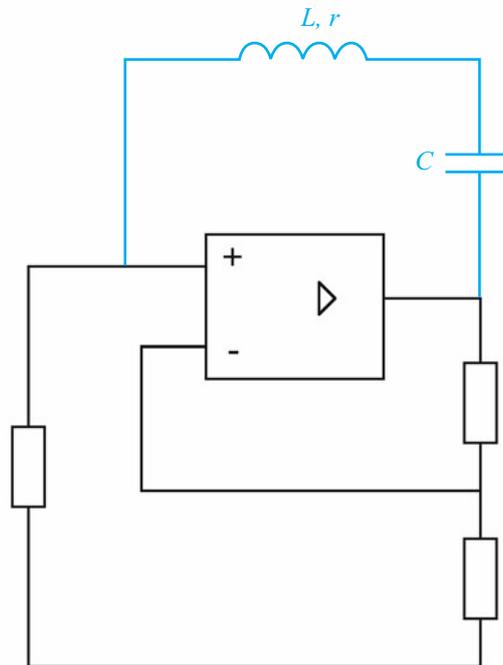
$$i = \frac{dq}{dt} = -Q_m \omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi) = I_m \cos\left(\omega_0 t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right).$$



E Entretien des oscillations

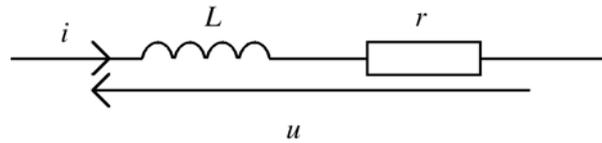
La résistance des bobines n'étant pas nulle, il est difficile d'obtenir une tension sinusoïdale ; aussi compense-t-on les pertes d'énergie par effet Joule dues à la résistance r en fournissant au circuit de l'énergie par un dispositif schématisé ci-dessous ; ce dispositif n'est pas à connaître.

Le dispositif qui entretient les oscillations fournit l'énergie évacuée par transfert thermique.



Résumé

En convention récepteur, la tension u aux bornes d'une bobine s'exprime par : $u = ri + L \frac{di}{dt}$.



La grandeur L est l'inductance de la bobine ; elle s'exprime en Henry (H).

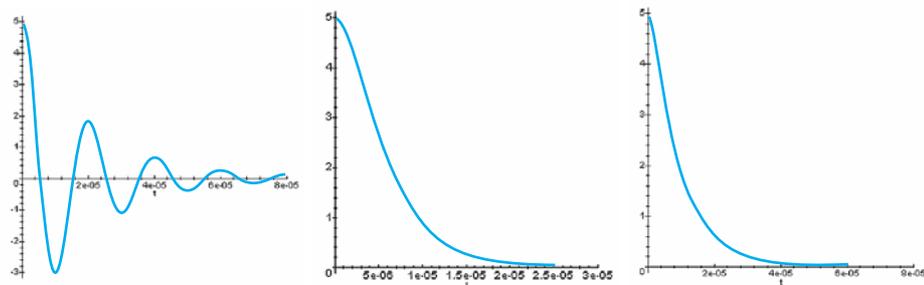
Intensité du courant dans un dipôle RL soumis à un échelon de tension : $i = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$; $\tau = \frac{L}{R}$
est la constante de temps du circuit.

Tension aux bornes de la bobine : $u_L = E e^{-\frac{t}{\tau}}$.

L'énergie W emmagasinée par une bobine d'inductance L , parcourue par un courant d'intensité i , est donnée par la relation : $W = \frac{1}{2} Li^2$.

Une bobine s'oppose aux variations du courant du circuit où elle se trouve et l'intensité de ce courant ne subit pas de discontinuité.

Décharge oscillante d'un condensateur dans une bobine avec amortissement :



L'énergie fournie par le condensateur est emmagasinée par la bobine puis restituée au condensateur ; cette énergie est progressivement dissipée par transfert thermique dans la résistance (effet Joule).

Dans le cas d'un amortissement négligeable, la tension aux bornes du condensateur s'écrit : $u_C = (U_C)_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$; l'intensité du courant dans le circuit est donnée par : $i = I_m \cos\left(\omega_0 t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right)$; la période propre du circuit LC s'exprime par : $T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$.

Dans le cas où l'amortissement n'est pas négligeable, il est possible d'obtenir des oscillations sinusoïdales de période donnée en utilisant un dispositif qui entretient les oscillations ; ce dispositif fournit l'énergie évacuée par transfert thermique dans la résistance.

E

xercices

Exercice ❶ Vrai ou faux

- ❶ L'unité de l'inductance est le Henry.
- ❷ L'inductance d'une bobine sans noyau de fer doux dépend de l'intensité du courant traversant la bobine.
- ❸ L'intensité du courant dans un circuit série contenant une bobine peut subir une discontinuité à l'ouverture d'un interrupteur présent dans ce circuit.
- ❹ Dans un circuit RL série, la constante de temps qui caractérise l'établissement du courant dans le circuit est proportionnelle à l'inductance L et inversement proportionnelle à la résistance R .
- ❺ La période propre d'un circuit LC est donnée par : $T_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{LC}}$.

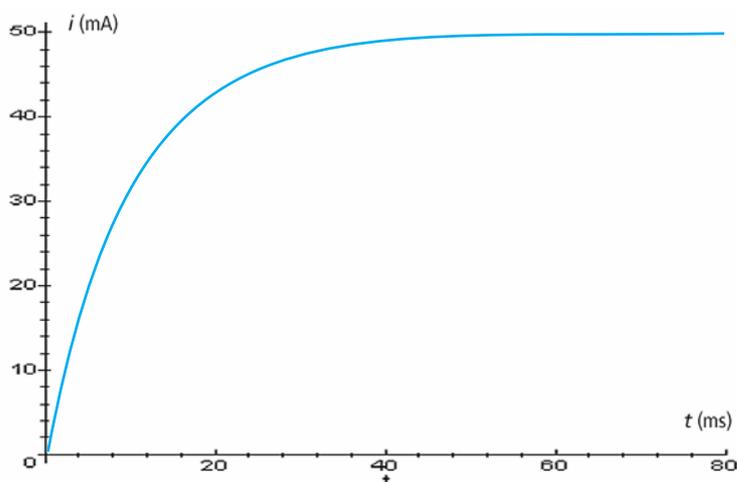
Exercice ❷ Tension aux bornes d'une bobine

On considère une bobine de bornes A et B d'inductance L et de résistance r parcourue par un courant d'intensité i dont le sens est de A vers B.

- ❶ Donner la représentation symbolique de la bobine et sur ce schéma placer la flèche-tension représentant u_{AB} .
- ❷ Donner la relation entre la tension u_{AB} aux bornes de la bobine et l'intensité i qui la parcourt.

Exercice ❸ Étude graphique de l'établissement du courant dans un circuit

Dans un circuit série constitué d'un générateur, d'une bobine et d'une résistance, on a enregistré l'évolution de l'intensité du courant i en fonction du temps (i en mA ; t en ms).



- ❶ Quelle est la valeur de l'intensité du courant en régime permanent ?
- ❷ Déterminer la constante de temps du circuit en utilisant deux méthodes :
 - ▶ en traçant la tangente à la courbe à l'instant de date $t = 0$;
 - ▶ en recherchant la durée mise par l'intensité pour atteindre 63 % de sa valeur.
- ❸ On donne $R = 100 \Omega$.

Déterminer la valeur de l'inductance L et la f.é.m. E du générateur.

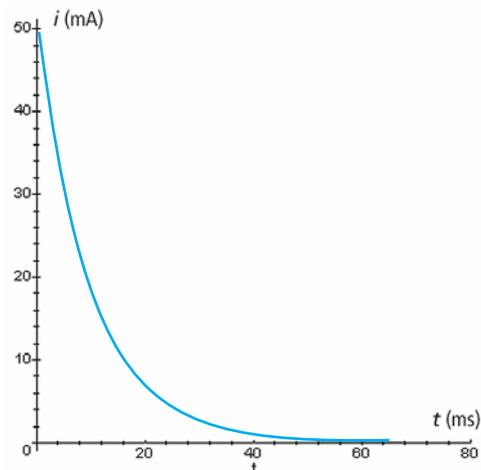
Exercice 4 Établissement du courant dans un circuit

Un circuit en série est composé d'une pile (de f.é.m. 6 V et de résistance interne $1,5 \Omega$), d'une bobine (d'inductance 15 mH et de résistance $2,5 \Omega$) et d'un conducteur ohmique de résistance 6Ω . Un courant s'établit progressivement dans le circuit.

- Exprimer et calculer la constante de temps du circuit.
- Exprimer et calculer l'intensité du courant dans la bobine après un temps de 4,5 ms.
- Exprimer et calculer la tension aux bornes de la résistance après un temps de 4,5 ms.
- Exprimer et calculer la tension aux bornes de la bobine après un temps de 4,5 ms.

Exercice 5 Étude graphique de la disparition du courant dans un circuit

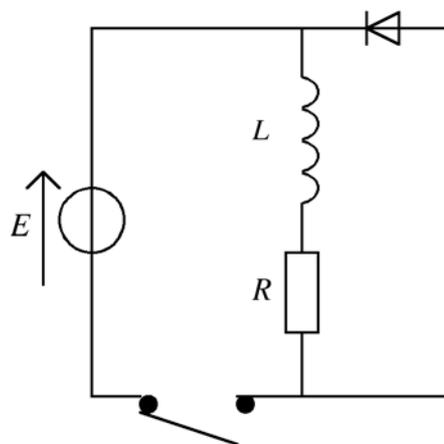
Dans un circuit série constitué d'un générateur, d'une bobine et d'une résistance, on a enregistré l'évolution de l'intensité du courant i en fonction du temps.



- Quelle est la valeur de l'intensité du courant à l'instant initial ?
- Déterminer la constante de temps du circuit en utilisant les deux méthodes de l'exercice n° 3.

Exercice 6 Disparition du courant dans un circuit

Un dipôle RL constitué d'une bobine d'inductance $L = 40 \text{ mH}$ et d'un conducteur ohmique de résistance $R = 25 \Omega$ est traversée par un courant d'intensité I_0 ($I_0 = 2 \text{ A}$) lorsque ce dipôle est relié à un générateur de tension. On ouvre l'interrupteur.

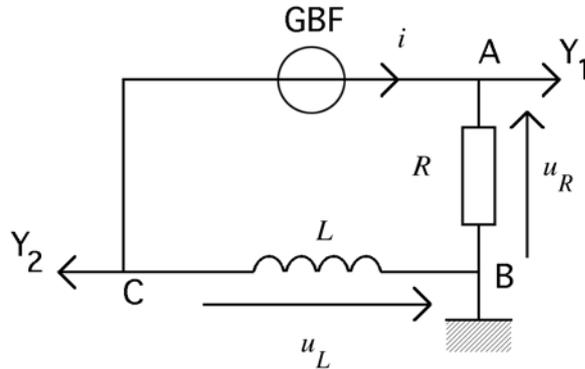


- Exprimer et calculer l'énergie emmagasinée dans la bobine.
- Exprimer et calculer la constante de temps du circuit ainsi constitué.

- ③ Exprimer et calculer l'intensité du courant dans la bobine après un temps de 1,6 ms.
- ④ Exprimer et calculer la tension aux bornes de la résistance après un temps de 1,6 ms.
- ⑤ Exprimer et calculer la tension aux bornes de la bobine après un temps de 1,6 ms.

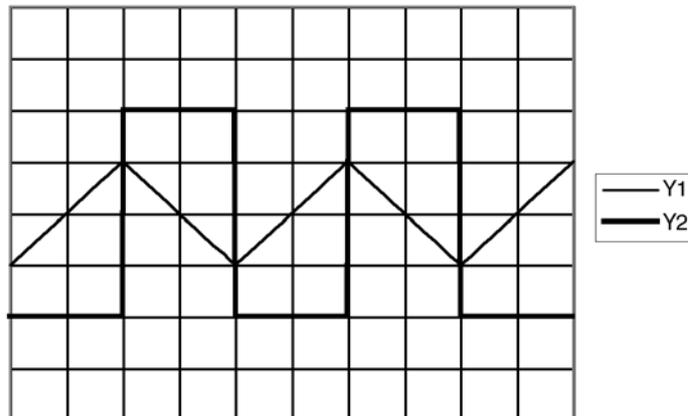
Exercice 7 Dipôle RL alimenté par un GBF

On considère le circuit RL de l'activité (2) constitué d'un générateur basse fréquence (GBF), d'une résistance de valeur R , d'une bobine d'inductance L (sa résistance de valeur r est négligeable dans ce circuit) ; un oscilloscope est branché sur ce circuit (voir schéma).



Données : $R = 10 \Omega$; sensibilités de l'oscilloscope : voie 1 : $2 \text{ V} \cdot \text{div}^{-1}$; voie 2 : $50 \text{ mV} \cdot \text{div}^{-1}$; base de temps : $1 \text{ ms} \cdot \text{div}^{-1}$.

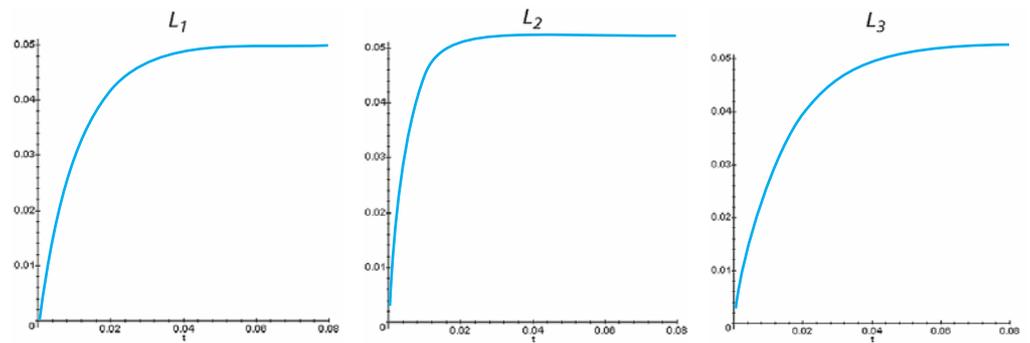
Le GBF délivre une tension périodique triangulaire. On obtient sur l'oscilloscope les courbes suivantes :



- ① a) D'après les branchements figurant sur le schéma, quelles sont les grandeurs physiques qui sont visualisées sur l'écran de l'oscilloscope ?
- b) Déterminer la fréquence des signaux observés sur l'oscillogramme.
- ② Exprimer la tension u_{AB} en fonction de l'intensité i du courant.
- ③ Déduire de la question 2 une relation entre la tension u_{CB} , l'inductance L , la résistance de valeur R et la dérivée par rapport au temps de la tension u_{AB} .
On justifiera la forme de la tension observée sur la voie Y_2 .
- ④ Donner la valeur numérique de l'inductance L de la bobine.

Exercice 8 Influence de l'inductance sur la constante de temps

Un dipôle RL est branché aux bornes d'un générateur de tension ; on fait varier l'inductance de la bobine ; la résistance R et la f.é.m. E du générateur sont constantes.



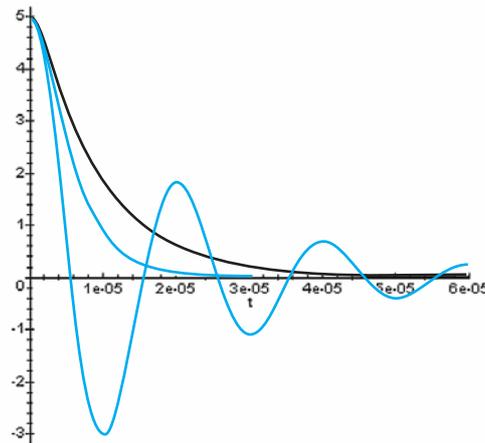
Observer ces trois courbes obtenues avec un oscilloscope à mémoire donnant l'intensité i dans le circuit (en A) en fonction du temps t (en s) et classer les inductances de la plus faible à la plus forte.

Exercice 9 Décharge oscillante d'un condensateur dans une bobine

On considère un circuit RLC suivant constitué d'un conducteur ohmique (de résistance R), d'une bobine (de résistance négligeable et d'inductance L) et d'un condensateur (de capacité C).

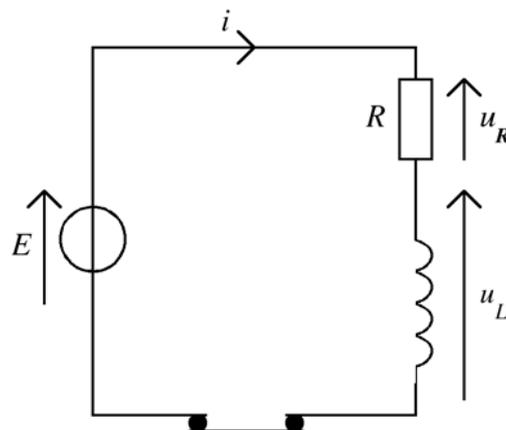
Un ordinateur relié au circuit a permis d'enregistrer l'évolution au cours du temps de la tension u_C aux bornes du condensateur pour trois valeurs de la résistance R .

- 1 À chaque courbe correspond un régime différent ; nommez-le.
- 2 Pour quelle courbe la résistance est-elle la plus importante ?
- 3 Interpréter en terme d'énergie les trois courbes obtenues.



Exercice 10 Établissement du courant

On considère le montage suivant :



On appelle R la résistance totale du circuit. **Données :** $R = 4,0 \Omega$, $L = 120 \text{ mH}$; $E = 12 \text{ V}$.

- ❶ À la date $t = 0$, on ferme l'interrupteur. Décrire brièvement ce qui va se passer.
- ❷ Établir l'équation différentielle donnant l'intensité i à la date t .
- ❸ Vérifier que $i = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L} t} \right)$ est solution de cette équation différentielle.
- ❹ Tracer l'allure de la courbe donnant i en fonction de t en prenant comme échelle la constante de temps du circuit.
- ❺ Exprimer et calculer l'énergie magnétique « stockée » dans la bobine à la date $t = 0$ puis en régime permanent (pour $t \gg 5 \tau$).

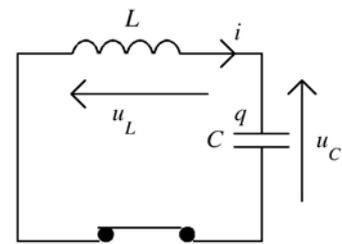
Exercice 10 Condensateur et bobine

Données: $C = 30 \text{ mF}$ et $L = 0,10 \text{ H}$.

L'équation différentielle associée à la décharge oscillante d'un condensateur initialement chargé dans une bobine s'écrit :

$$\frac{d^2 q(t)}{dt^2} + \frac{1}{LC} q(t) = 0 \quad (1).$$

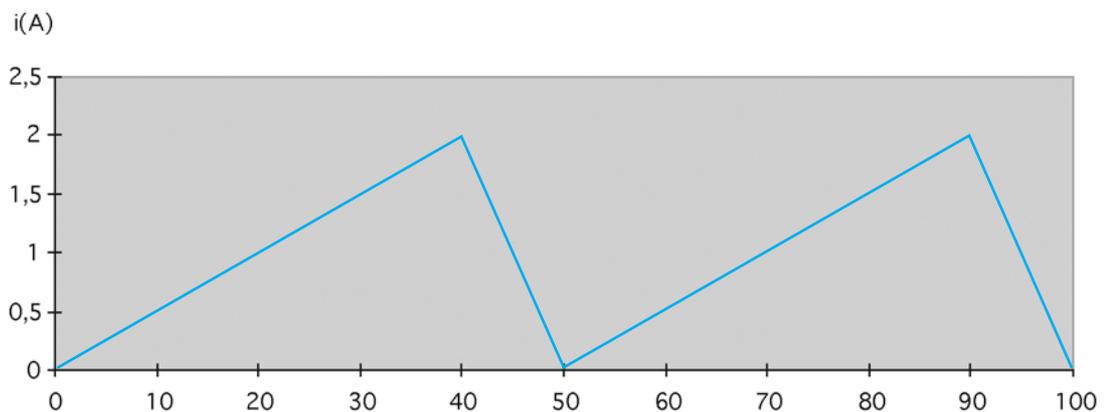
- ❶ Donner l'expression de l'énergie électromagnétique totale du circuit. On suppose que la résistance du circuit est nulle.
 - ❷ Retrouver l'équation (1) en utilisant le fait que l'énergie électromagnétique du circuit est constante en l'absence de résistance.
 - ❸ Le circuit constitué par la bobine et le condensateur portant la charge $Q_0 = 4 \cdot 10^{-4} \text{ C}$ a été fermé à l'instant pris comme origine des temps $t = 0$. Exprimer $q(t)$.
 - ❹ Exprimer, en fonction de L et C , la période propre T_0 des oscillations électriques.
 - ❺ Représenter l'allure du graphe associé à l'expression $q = f(t)$.
- Que deviendrait ce graphe si l'on ajoutait une résistance faible ?
Que deviendrait ce graphe si l'on ajoutait une résistance forte ?



Exercice 12 Solénoïde alimenté par un GBF

Un solénoïde (A, B) de résistance négligeable et d'inductance L ($L = 10 \text{ mH}$) est parcouru par un courant i dont l'intensité varie avec le temps comme l'indique le graphique suivant.

Les bornes A et B du solénoïde sont reliées à un oscilloscope afin de visualiser la tension u_{AB} .



- a) Donner l'expression de la tension u_{AB} au cours de deux phases pour t variant de 0 à 50 ms.
- b) Tracer la courbe $u_{AB}(t)$ visualisée à l'oscilloscope sachant que :
 - ▶ la base de temps est réglée sur $10 \text{ ms} \cdot \text{cm}^{-1}$;
 - ▶ la sensibilité verticale est de $0,5 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$.

Chimie

Objectifs

- ▶ Savoir que K_e est la constante associée à l'équation de la réaction d'autoprotolyse de l'eau.
- ▶ Connaissant la valeur du pH d'une solution aqueuse, dire si elle est acide, basique ou neutre.
- ▶ À partir de la concentration molaire des ions H_3O^+ ou OH^- , déduire la valeur du pH de la solution.
- ▶ Associer la constante d'acidité K_A à l'équation de la réaction d'un acide sur l'eau.
- ▶ Déterminer la constante d'équilibre associée à l'équation d'une réaction acido-basique à l'aide des constantes d'acidité des couples en présence.
- ▶ Connaissant le pH d'une solution aqueuse et le pK_A du couple acide/base, indiquer l'espèce prédominante ; application aux indicateurs colorés.
- ▶ Réaliser par suivi pH-métrique le titrage d'un acide ou d'une base en solution aqueuse.
- ▶ Déterminer, à partir des résultats d'une expérience, le volume versé à l'équivalence lors d'un titrage acide-base.
- ▶ Montrer qu'un indicateur coloré convenablement choisi permet de repérer l'équivalence.

La mesure du pH de l'eau fraîchement distillée et mise à l'abri de l'air (eau pure) à 25 °C est de : **7,0**.

(Il est, en effet, préférable de prendre de l'eau fraîchement distillée car le dioxyde de carbone atmosphérique se dissout dans l'eau et acidifie celle-ci).

Activité ① En déduire la valeur de la concentration en ions H_3O^+ de l'eau pure.

Cela signifie que l'eau pure ne contient pas uniquement des molécules d'eau H_2O , mais aussi des ions H_3O^+ .

Activité ② Sachant que l'eau est fraîchement distillée et parfaitement isolée de l'extérieur, en déduire la provenance de ces ions H_3O^+ .

Activité ③ Écrire alors l'équation de la réaction appelée réaction d'autoprotolyse (ou auto ionisation) de l'eau. Justifier le terme auto ionisation.

On déduit, de la valeur de la concentration des ions hydronium que en moyenne, 2 molécules d'eau, sur environ 1 milliard, se dissocient en ions.

Activité ④

- Que peut-on alors dire de l'avancement de la transformation associée à la réaction précédente ?
- Quelle est, pour l'eau pure, la valeur de la concentration en ions hydroxyde $[\text{OH}^-]$ à 25 °C ?
- Exprimer puis calculer la valeur de la constante de l'équilibre d'autoprotolyse.

Cette constante est nommée **produit ionique de l'eau** et notée K_e tel que :

$$K_e = [\text{H}_3\text{O}^+] \times [\text{OH}^-].$$

Nous admettrons, pour toute solution aqueuse à 25 °C :

$$K_e = [\text{H}_3\text{O}^+] \times [\text{HO}^-] = 1,0 \cdot 10^{-14} \quad (\text{sans unité}).$$

Comme pour le pH, on définit : $\text{p}K_e = -\log K_e = 14$ (à 25 °C).

À noter que le produit ionique K_e de l'eau augmente lorsque la température augmente :

Exemple : à 0 °C : $K_e = 1,1 \cdot 10^{-15}$ soit $\text{p}K_e \approx 15,0$

à 100 °C : $K_e = 5,5 \cdot 10^{-13}$ soit $\text{p}K_e \approx 12,3$

À 25 °C, il est ainsi possible de déterminer le caractère acide, neutre ou basique d'une solution aqueuse selon la valeur de son pH :

Une solution aqueuse est **neutre** si elle contient autant d'ions hydronium H_3O^+ que d'ions hydroxyde OH^- .

$$\text{Soit : } [\text{H}_3\text{O}^+] = [\text{OH}^-] \text{ or : } K_e = [\text{H}_3\text{O}^+] \times [\text{OH}^-] = [\text{H}_3\text{O}^+]^2 = 1,0 \cdot 10^{-14}.$$

$$\text{Donc : } [\text{H}_3\text{O}^+] = \sqrt{K_e} = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ ou } \text{pH} = \frac{1}{2} \text{p}K_e = 7,0.$$

Une solution aqueuse est **acide** si elle contient plus d'ions hydronium H_3O^+ que d'ions hydroxyde OH^- .

$$\text{Soit : } [\text{H}_3\text{O}^+] > [\text{OH}^-]$$

$$\text{Donc : } [\text{H}_3\text{O}^+] > \sqrt{K_e} = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ ou } \text{pH} < 7,0.$$

Une solution aqueuse est **basique** si elle contient moins d'ions hydronium H_3O^+ que d'ions hydroxyde OH^- .

$$\text{Soit : } [\text{H}_3\text{O}^+] < [\text{OH}^-]$$

$$\text{Donc : } [\text{H}_3\text{O}^+] < \sqrt{K_e} = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ ou } \text{pH} > 7,0.$$

Solution acide	Solution neutre	Solution basique
pH < 7,0	pH = 7,0	pH > 7,0

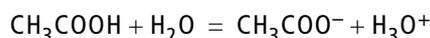
Activité 6 Calculer la valeur du pH des solutions de concentration :

▶ $[\text{H}_3\text{O}^+] = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

▶ $[\text{OH}^-] = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

Pour chaque cas, préciser si la solution est acide, neutre ou basique.

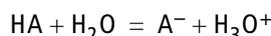
Dans le séquence précédente, nous avons vu que l'acide éthanoïque réagit sur l'eau selon l'équation équilibrée :



L'expression de la constante d'équilibre K étant :

$$K = \frac{[\text{CH}_3\text{COO}^-] \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{CH}_3\text{COOH}]}$$

Il est alors possible de généraliser ce résultat et de dire que dans le cas de la réaction d'un acide de formule générale HA sur l'eau, à l'équation de la réaction :



Est associée une constante d'équilibre notée K_A telle que :

$$K_A = \frac{[\text{A}^-] \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{HA}]}$$

La constante K_A qui est sans dimension (sans unité), est appelée **constante d'acidité** du couple HA/A^- .

Comme pour le produit ionique de l'eau, on définit aussi : $\text{p}K_A = -\log K_A$.

Ainsi, la valeur de la constante d'acidité K_A caractérise un couple acide-base donné.

Pour finir, comparons la valeur du pH de différents acides à concentration C égale ($1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) :

Acide	Acide éthanoïque CH_3COOH	Acide méthanoïque HCOOH	Acide benzoïque $\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}$	Chlorure d'ammonium NH_4Cl
pH	3,4	2,9	3,1	5,6

Activité 6 À partir de la valeur du pH de chaque acide, calculer la valeur de sa constante d'acidité K_A .

On voit que, pour une concentration donnée, plus la valeur de la constante d'acidité K_A d'un acide est élevée, plus son pH est faible (caractère acide plus prononcé).

De la même manière, comparons le comportement de différentes bases de même concentration ($1,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) :

Base	Ion éthanoate CH_3COO^-	Ion méthanoate HCOO^-	Ion benzoate $\text{C}_6\text{H}_5\text{COO}^-$	Ammoniac NH_3
pH	8,4	7,9	8,1	10,6

Activité 7 a) Écrire l'équation générale de la réaction d'une base B sur l'eau.

b) Exprimer la constante d'équilibre K et trouver la relation entre K et la constante d'acidité K_A .

c) À partir de la valeur du pH de chaque base, calculer la valeur de leur constante d'acidité K_A .

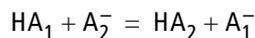
On retrouve bien la conclusion précédente. Mais on peut aussi ajouter que, plus la constante K_A est faible, plus la réaction entre B et H_2O est avancée.

Activité 8 ① Réécrire cette conclusion en reliant pH et $\text{p}K_A$, cette fois.

② À partir de la définition de K_A , écrire la relation reliant pH et $\text{p}K_A$.

③ Quelle est la relation entre pH et $\text{p}K_A$ si $[\text{HA}] = [\text{A}^-]$?

Soit la réaction d'équation :



Cet équilibre chimique est caractérisé par sa constante d'équilibre notée K_R et définie par :

$$K_R = \frac{[\text{A}_1^-] \times [\text{HA}_2]}{[\text{HA}_1] \times [\text{A}_2^-]}$$

Or, cette réaction acido-basique fait intervenir 2 couples acide-base : le couple HA_1/A_1^- et le couple HA_2/A_2^- .

Ce qui revient à dire que l'équation de la réaction ci-dessus peut être considérée comme étant la somme des équations de transfert de protons au niveau de chaque couple :



Activité 9 À partir des expressions des constantes d'acidité des couples K_{A1} et K_{A2} , exprimer K_R en fonction de K_{A1} et K_{A2} .

Activité 10 a) Écrire l'équation de la réaction entre l'acide éthanóique et l'ammoniac (couples acide-base : $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{CH}_3\text{COO}^-$ et $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$).

b) Calculer la valeur de la constante d'équilibre K_R ($\text{p}K_A$ des couples : $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{CH}_3\text{COO}^- : 4,8$ et $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3 : 9,2$).

Zone de virage d'un indicateur coloré

Les indicateurs colorés sont des acides ou des bases dont les formes acide et basique conjuguées ont des teintes différentes.

Les indicateurs colorés peuvent être utilisés comme indicateur de fin de dosage (voir plus loin) mais aussi pour indiquer l'état du système (valeur du pH) lors, par exemple d'une synthèse ou d'une extraction en Chimie organique.

Prenons l'exemple du bleu de bromothymol : ajoutons quelques gouttes de cet indicateur coloré dans :

- 1 : une solution d'acide chlorhydrique de pH 2,0.
- 2 : de l'eau fraîchement distillée de pH proche de 7,0.
- 3 : une solution d'hydroxyde de sodium de pH 10,0.

Le bleu de bromothymol prend une couleur jaune dans la solution acide, une coloration verte dans l'eau distillée (milieu sensiblement neutre) tandis qu'il devient bleu dans la soude (basique).

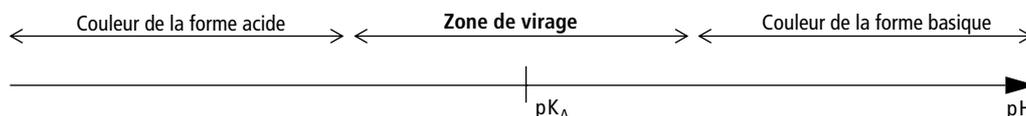
On en déduit que la couleur jaune de l'indicateur est la couleur dominante à pH 2,0 tandis que le bleu est la couleur dominante à pH 10,0.

Couleur dominante signifie qu'une espèce (acide ou basique) est prépondérante (sur l'autre espèce conjuguée).

Activité ①

- ① Quelle est l'espèce du B.B.T. prépondérante à pH 2,0 ? à pH 10,0 ?
- ② Que peut-on dire alors lorsque la couleur de l'indicateur est verte ?

Le **diagramme de prédominance** d'un indicateur présente la particularité de posséder une **zone de virage** : c'est la zone de pH pour laquelle ni la forme acide, ni la forme basique ne sont suffisamment prépondérantes pour imposer leur couleur :

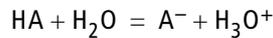


Les principaux indicateurs colorés utilisés au lycée sont :

Indicateur coloré	pK_A	
Hélianthine	3,6	Rouge 3,1 orangé 4,4 jaune
Vert de bromocrésol	4,8	Jaune 3,8 vert 5,4 bleu
Rouge de méthyle	5,1	Rouge 4,2 orangé 6,2 jaune
Bleu de bromothymol	6,8	Jaune 6,0 vert 7,6 bleu
Rouge de phénol	7,2	Jaune 6,8 orangé 8,4 rouge
Phénolphthaléine	9,0	Incolore 8,2 rose 10 mauve
Jaune d'alizarine	11,0	Jaune 10,1 violet 12,0 lilas

Diagramme de prédominance et diagramme de distribution

Dans toute solution aqueuse contenant le couple acide HA/base A^- , on peut écrire l'équilibre :



De constante appelée constante d'acidité du couple HA/ A^- :

$$K_A = \frac{[A^-] \cdot [H_3O^+]}{[HA]}$$

De cette expression, on peut extraire la concentration des ions hydronium :

$$[H_3O^+] = \frac{[HA] \cdot K_A}{[A^-]}$$

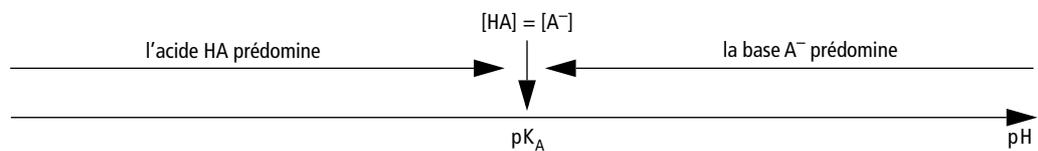
Ce qui donne : $-\log [H_3O^+] = -\log \left(\frac{[HA] \cdot K_A}{[A^-]} \right)$, soit :

$$\boxed{pH = pK_A + \log \frac{[A^-]}{[HA]}}$$

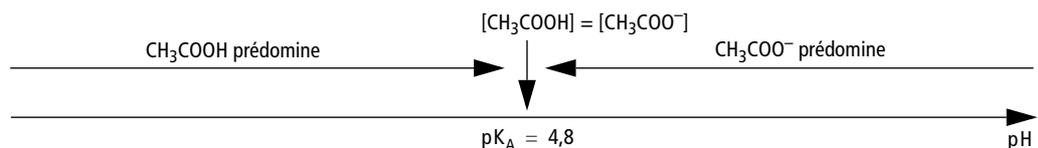
Raisonnons alors sur l'évolution de la valeur du pH par rapport à celle du pK_A :

- ▶ $pH = pK_A$: alors : $\log \frac{[A^-]}{[HA]} = 0$ soit : $\frac{[A^-]}{[HA]} = 1$ soit : $[HA] = [A^-]$: acide et base conjugués sont en quantités égales.
- ▶ $pH > pK_A$: alors : $\log \frac{[A^-]}{[HA]} > 0$ soit : $\frac{[A^-]}{[HA]} > 1$ soit : $[A^-] > [HA]$: la base est en quantité supérieure à son acide conjugué ; on dit que la **base est prédominante**, ou que l'on se trouve dans le **domaine de prédominance de la base A^-** .
- ▶ $pH < pK_A$: alors : $\log \frac{[A^-]}{[HA]} < 0$ soit : $\frac{[A^-]}{[HA]} < 1$ soit : $[HA] < [A^-]$: l'acide est en quantité supérieure à sa base conjuguée : on dit que **l'acide est prédominant**, ou que l'on se trouve dans le **domaine de prédominance de l'acide HA**.

On peut résumer ceci par le **diagramme de prédominance** :

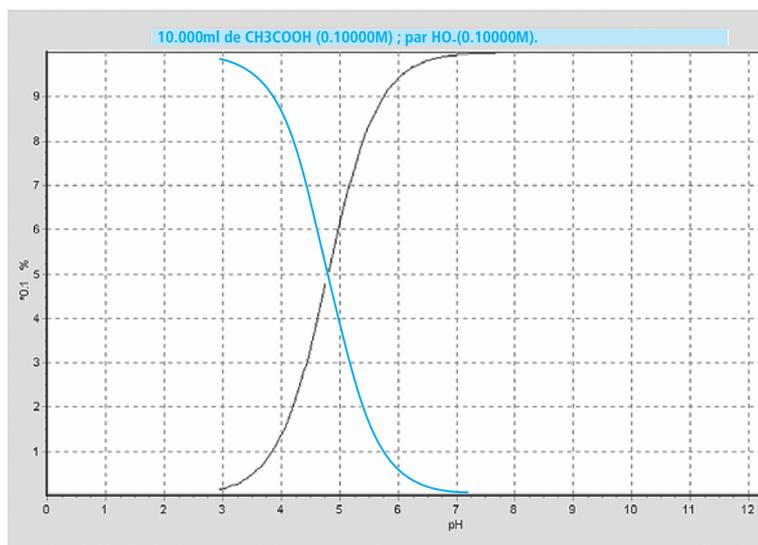


Par exemple, dans le cas de l'acide éthanóique CH_3COOH (pK_A du couple : 4,8), on trouve :



Certains logiciels de simulation permettent de tracer les diagrammes de distribution : un **diagramme de distribution** est un graphe exprimant les variations du pourcentage des espèces chimiques en fonction du pH.

Toujours sur l'exemple de l'acide éthanóique, on obtient :



Activité ② Identifier chaque courbe (% de l'acide éthanóique et % de la base éthanóate).

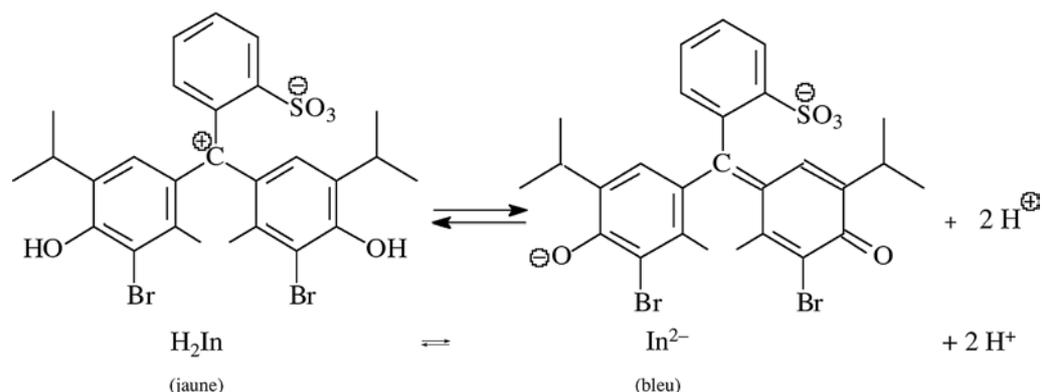
L'objectif de ce paragraphe est de :

- Comprendre le mode de fonctionnement d'un indicateur coloré.
- Déterminer par spectrophotométrie le diagramme de distribution, en fonction du pH, des formes acide et basique du bleu de bromothymol et en déduire le domaine de prédominance de ces espèces en fonction du pH.

A L'indicateur coloré

Pour déterminer le domaine de prédominance des formes acide et basique du bleu de bromothymol, il faut disposer de solutions de cet indicateur dans lesquelles les quantités en forme acide, HIn et en forme basique In^- sont variables (à concentration molaire apportée constante en indicateur). Une série de solutions de pH croissant est préparée à l'aide de soude et d'une quantité constante de bleu de bromothymol.

Le bleu de bromothymol est en fait un diacide qui devrait être noté H_2In , les deux formes observées selon le pH du milieu sont les espèces du couple H_2In/In^{2-} selon :

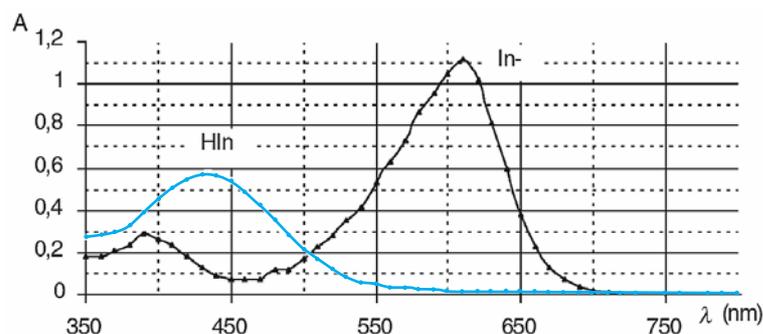


de constante d'acidité K_A de ce couple, $K_A = \frac{[In^{2-}]^{1/2} \cdot [H^+]}{[H_2In]^{1/2}}$.

B Choix de la longueur d'onde pour faire les mesures

Pour simplifier, le bleu de bromothymol est considéré comme un monoacide : la forme acide de l'indicateur coloré est notée HIn et sa forme basique In^- .

Les spectres d'absorption des formes acide, HIn , et basique In^- du bleu de bromothymol sont donnés ci-dessous :



S'il existe un domaine de longueur d'onde où seule l'une des formes de l'indicateur absorbe, alors, en se plaçant à la longueur d'onde correspondant pour cette espèce au maximum d'absorption, il est aisé, par la mesure de l'absorbance des solutions précédemment préparées, de tracer la courbe de l'évolution des concentrations des formes acide et basique du bleu de bromothymol en fonction du pH. Ce graphique est appelé diagramme de distribution des espèces.

Activité 13 À partir du graphe : $A = f(\lambda)$, choisir la valeur de la longueur d'onde du maximum d'absorption de la forme basique du bleu de bromothymol.

C Manipulation

Toutes les mesures de pH sont effectuées avec le même pH-mètre.

- Préparation de la solution (S_i) :
prélever, dans un premier bécher, à l'aide de la pipette jaugée, un volume $V = 20,00$ mL de solution « Britton-Robinson » (mélange d'acide phosphorique, d'acide éthanóïque et d'acide borique).
- ajouter, à la burette, le volume V_i de solution d'hydroxyde de sodium de concentration molaire $1,00 \cdot 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ selon les indications figurant dans le tableau ci-dessous.
- prélever 10,00 mL de chacune des solutions ainsi préparées dans un second bécher, y ajouter 1,00 mL de solution de bleu de bromothymol, soit (S_i) la solution ainsi préparée ;
- Mesurer du pH de la solution (S_i) .
- Mesure de l'absorbance de la solution (S_i) à l'aide d'un spectrophotomètre :
– régler le spectrophotomètre à la longueur d'onde $\lambda = 620$ nm et faire le blanc ;
– rincer la cuve avec la solution (S_i) et mesurer l'absorbance de la solution (S_i) ;
– Consigner les valeurs mesurées de l'absorbance et du pH dans le tableau général.

D Tableau des valeurs obtenues

solution (S_i)	V_i	pH	A	$[\text{In}^-] (\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	$[\text{HIn}] (\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$
1	4,00	4,8	0,00	0,00	$2,73 \cdot 10^{-5}$
2	4,50	5,2	0,00	0,00	$2,73 \cdot 10^{-5}$
3	5,00	5,8	0,004	0,00	$2,73 \cdot 10^{-5}$
4	5,50	6,3	0,013	0,00	$2,73 \cdot 10^{-5}$
5	6,00	6,7	0,26	$0,65 \cdot 10^{-5}$	$2,08 \cdot 10^{-5}$
6	6,50	7,0	0,42		
7	7,00	7,3	0,63		
8	7,50	7,8	0,89		
9	8,00	8,2	1,05		
10	8,50	8,7	1,09		
11	9,00	8,8	$1,094 = A_{\text{max}}$		

Activité 14 Pour tracer la courbe de l'évolution des concentrations des formes acide et basique de l'indicateur, il faut établir, pour chacune des deux formes de l'indicateur (basique d'une part et acide d'autre part), une relation entre la concentration effective de la forme considérée et l'absorbance mesurée.

a) En utilisant la conservation de la quantité de matière effective, écrire la relation entre la concentration molaire apportée en bleu de bromothymol et les concentrations molaires effectives des formes acide HIn et basique In^- .

b) À la longueur d'onde choisie, seule l'espèce In^- absorbe ; en déduire la relation entre la concentration molaire effective en In^- et l'absorbance A à différents pH.

c) En considérant qu'à pH élevé seule la forme basique du bleu de bromothymol, In^- est présente, que vaut la concentration molaire effective en forme acide, HIn ? Exprimer l'absorbance A, notée A_{max} , en fonction de la concentration molaire apportée, C en bleu de bromothymol.

d) Calculer les valeurs des concentrations molaires effectives $[\text{HIn}]$ et $[\text{In}^-]$ et remplir le tableau ci-dessus.

Activité 15 ① Construire sur le même graphe les courbes représentatives de l'évolution des valeurs des concentrations molaires effectives $[\text{In}^-]$ et $[\text{HIn}]$ en fonction du pH. En déduire les domaines de prédominance des formes acide et basique de l'indicateur. Vérifier l'hypothèse faite à l'absorbance maximale.

② Déterminer la zone de virage de cet indicateur coloré, sachant que la zone de virage d'un indicateur coloré est généralement définie par l'intervalle de pH dans lequel le rapport des concentrations molaires des formes acide et basique est compris entre $1/10$ et 10 , soit : $\frac{1}{10} < \frac{[\text{In}^-]}{[\text{HIn}]} < 10$.

③ Montrer qu'un point particulier de ce graphe permet de déterminer le pK_A dit couple acide-base HIn/In^- et donc sa constante d'acidité.

L'étude se fera à partir de la réaction entre l'acide chlorhydrique et une solution d'hydroxyde de sodium.

A Étude qualitative de la réaction

Versons 100 mL d'une solution d'acide chlorhydrique de concentration $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, dans un bécher. Mesurons la température de l'acide à l'aide d'un thermomètre : $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ajoutons, dans ce bécher, 100 mL d'une solution d'hydroxyde de sodium de concentration $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (à $20 \text{ }^\circ\text{C}$).

On constate, grâce au thermomètre, une augmentation de température du mélange ainsi formé jusqu'à environ $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Le système a donc subi une transformation chimique.

Activité 16 *La transformation est-elle endothermique ? athermique ? exothermique ?*

Afin de déterminer l'équation de la réaction associée à cette transformation, on chauffe le mélange obtenu de façon à provoquer l'évaporation de l'eau (solvant).

On constate, après déshydratation, l'apparition d'un dépôt blanchâtre sur les parois et le fond du bécher. Ce dépôt est du chlorure de sodium NaCl.

Activité 17 ① *Quelle est la nature du chlorure de sodium solide : moléculaire ou ionique ?*

② *Dans le cas d'une structure ionique, quels types d'ions ?*

Activité 18 *Écrire alors l'équation de la réaction entre l'acide et l'hydroxyde de sodium.*

On constate que, dans l'équation-bilan, certains ions ne participent pas à la réaction, ce sont des ions spectateurs.

Activité 19 *Écrire alors l'équation simplifiée de la réaction (celle où n'apparaissent pas les ions spectateurs).*

Cette réaction est quasi-totale.

Activité 20 *Quel nom porte la réaction inverse ?*

B Évolution du pH au cours de la réaction

Pour tracer la courbe d'évolution du pH d'un mélange acide-base en fonction du volume V_B de base ajoutée, il faut d'abord remplir le tableau de valeurs :

Concentrations C_A de l'acide et C_B de la base toutes deux égales à $10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Volume initial V_A d'acide égal à 20 ml

V_B (mL)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	18,5
pH	2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,9	3,3	3,45
V_B (mL)	19	19,5	20	20,5	21	21,5	22	24	26	28	30
pH	3,6	4,2	7,0	9,3	10,0	10,3	10,5	10,9	11,0	11,1	11,2

Activité Schématiser le dispositif expérimental nécessaire pour effectuer de telles mesures.

Activité Tracer la courbe $\text{pH} = f(V_b)$.

La courbe qui est croissante, présente 3 parties distinctes :

- ▶ $0 < V_b < 17$ mL : partie rectiligne correspondant à une faible variation de pH.
- ▶ $V_b \approx 20$ mL « saut de pH » : brusque variation de pH avec changement de concavité de la courbe.
- ▶ $V_b > 21$ mL : faible variation de pH.

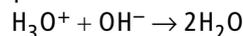
Activité ❶ Vers quelle valeur maximale tend le pH de la solution ?

❷ Justifier théoriquement le résultat.

Le changement de concavité de la courbe à $V_b \approx 20$ mL induit un point d'inflexion dans cette partie de la courbe.

En ce point, noté E, il y a **équivalence du dosage**, c'est-à-dire que les réactifs ont été mélangés dans les proportions définies par les nombres stoechiométriques de l'équation de la réaction considérée. Le point E est nommé **point équivalent**.

Ainsi à l'équivalence de la réaction d'équation :



Il y a égalité entre quantité de matière d'acide et de base, soit :

$$n_{\text{H}_3\text{O}^+ \text{ initialement présents}} = n_{\text{OH}^- \text{ ajoutés}} \quad \text{soit :}$$
$$C_a \times V_a = C_b \times V_{\text{beq}}$$

Avec V_{beq} : volume de soude versé à l'équivalence.

or : $[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{eq}} = [\text{OH}^-]_{\text{eq}}$, ce qui correspond à la définition d'une solution neutre, donc : $\text{pH} = 7,0$ à 25°C ce qui correspond à la valeur trouvée expérimentalement.

Le point équivalent E peut se déterminer graphiquement à l'aide de la méthode des tangentes

- ▶ tracer 2 tangentes à la courbe de part et d'autre de E.
- ▶ tracer ensuite une parallèle à ces 2 tangentes, équidistante de celles-ci ; son intersection avec la courbe $\text{pH} = f(V_b)$ donne le point équivalent E.

Activité Retrouver les coordonnées de E sur la courbe à l'aide de la méthode des tangentes.



Dosage d'un produit domestique contenant de la soude

Dosage d'une solution commerciale : DESTOP.

Doser une solution d'hydroxyde de sodium, c'est rechercher sa concentration en hydroxyde de sodium : C_b .

Le dosage peut se faire par une solution d'acide chlorhydrique titrée, c'est-à-dire de concentration C_a connue avec précision.

On procède d'abord à la dilution de la solution commerciale (S) très concentrée. On la dilue 50 fois. Soit (S') la solution diluée.

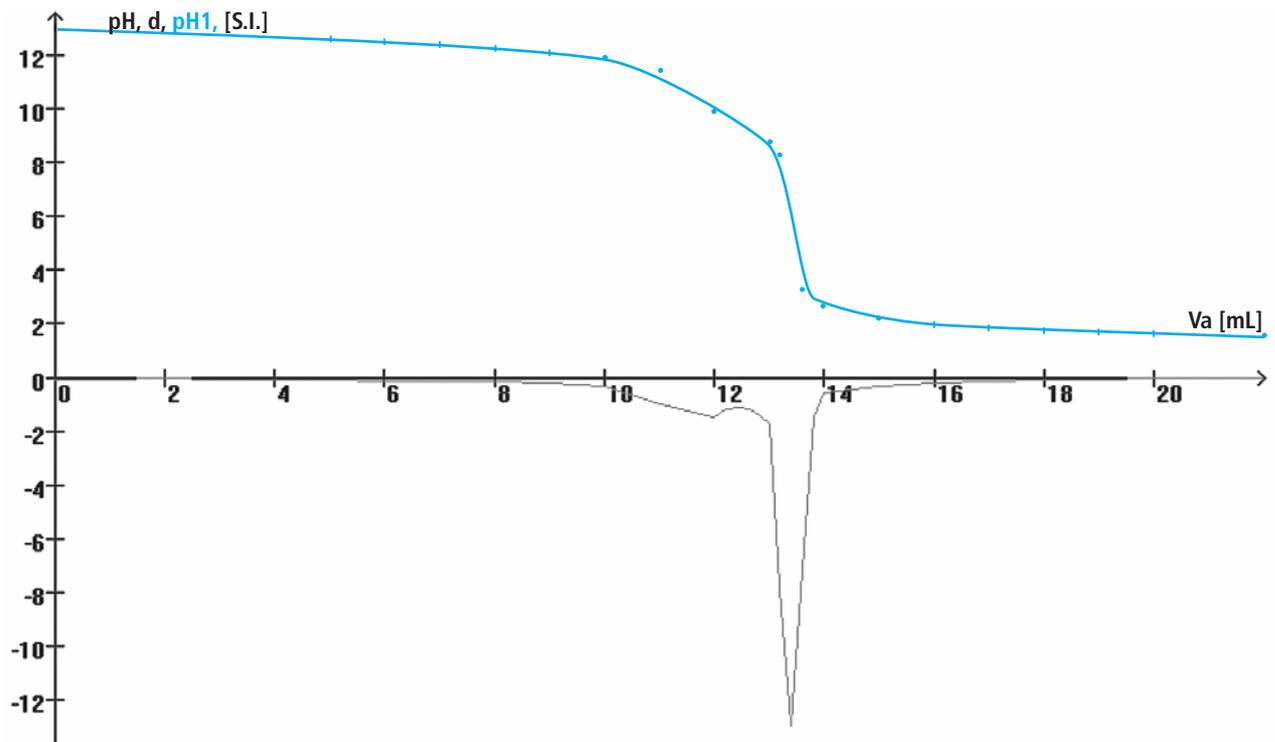
Activité Décrire le protocole expérimental permettant de diluer 50 fois la solution (S), de façon à obtenir 100 mL de S'.

On prélève 10,0 mL de S' que l'on dose par l'acide chlorhydrique titré à $0,100 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

On mesure l'évolution du pH de la solution S' lors de l'ajout progressif d'acide. L'équivalence du dosage peut être obtenu par 2 méthodes.

a) L'étude de la courbe $\text{pH} = f(V_A)$ avec V_A : volume d'acide ajouté

On obtient ci-dessous : le graphe $\text{pH} = f(V_A)$ ainsi que le tracé de la courbe dérivée.



On considère, en première approximation, l'existence d'un seul point équivalent, repérable à partir du principal saut de pH. Ceci signifie que l'on suppose que la solution dosée ne contient pour seule espèce basique, que de l'hydroxyde de sodium.

Activité

- ❶ Déterminer le volume équivalent V_E par la méthode des tangentes.
- ❷ En appliquant la relation entre quantités de matière à l'équivalence, calculer la concentration C'_b de la solution S' .
- ❸ En déduire la concentration C_b de la solution commerciale S .
- ❹ À partir de la valeur du pH obtenu pour $V_A = 5$ mL, calculer la quantité d'ions hydroxyde (en mol) encore présents, dans le mélange, à cette date.
- ❺ En déduire le taux d'avancement final t de la réaction. Que peut-on dire alors de la transformation subie par le système ?

Un étude plus approfondie du graphe fait apparaître :

- le pH à l'équivalence est légèrement inférieur à 7.
- le produit commercial dégage une odeur d'ammoniac.

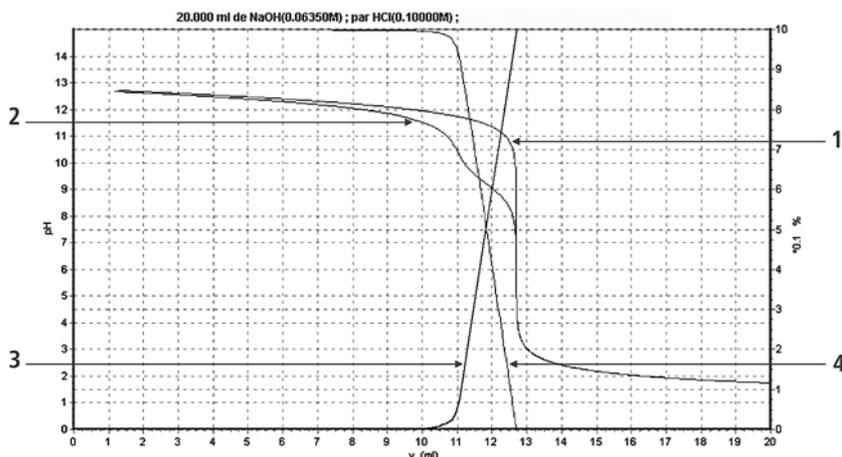
Il est possible d'envisager l'hypothèse que le produit commercial contient aussi de l'ammoniac.

Avec SIMULTIT, simulons le dosage de ce mélange.

En ajustant les concentrations par tâtonnement, on peut faire pratiquement coïncider courbe théorique avec la courbe expérimentale.

- 1 : Dosage de la soude par l'acide chlorhydrique.
- 2 : Dosage de la solution d'ammoniac et de soude.
- 3 : Évolution de la concentration en ion ammonium NH_4^+ au cours du dosage.

4 : Évolution de la concentration en ammoniac NH_3 au cours du dosage.



Cette simulation permet de justifier les affirmations précédentes.

Sur la courbe dérivée (voir plus haut), on constate l'apparition de 2 points équivalents : l'un vers 12 mL et l'autre vers 13,3 mL. Le premier correspond au dosage de l'ion hydroxyde, tandis que le second correspond au titrage de l'ammoniac.

Activité

Parmi les 3 indicateurs colorés suivants, lequel utiliser ?

Hélianthine

Bleu de bromothymol

rouge 3,1 ↔ 4,4 jaune

jaune 6,0 ↔ 7,6 bleu

Phénolphtaléine

incolore 8,2 ↔ 10,0 mauve.

On peut lire sur le flacon de la solution commerciale (S)

- ▶ densité de la solution par rapport à l'eau : 1,23
- ▶ pourcentage en masse d'hydroxyde de sodium : 20 %.

Activité

En déduire la concentration de (S) et comparer cette valeur avec celle trouvée à partir de la courbe de dosage.

Résumé

► L'équilibre $2\text{H}_2\text{O} = \text{H}_3\text{O}^+ + \text{HO}^-$ est caractérisé par sa constante, nommée **produit ionique de l'eau** et notée K_e tel que : $K_e = [\text{H}_3\text{O}^+] \times [\text{OH}^-]$.

Nous admettrons, pour toute solution aqueuse à 25 °C :

$$K_e = [\text{H}_3\text{O}^+] \times [\text{OH}^-] = 1,0 \cdot 10^{-14} \text{ (sans unité)}$$

Comme pour le pH, on définit : $\text{p}K_e = -\log K_e = 14$ (à 25 °C).

► Une solution aqueuse est **neutre** si elle contient autant d'ions hydronium H_3O^+ que d'ions hydroxyde OH^- . Son $\text{pH} = \frac{1}{2} \text{p}K_e = 7,0$.

Une solution aqueuse est **acide** si elle contient plus d'ions hydronium H_3O^+ que d'ions hydroxyde OH^- . Son $\text{pH} < 7,0$.

Une solution aqueuse est **basique** si elle contient moins d'ions hydronium H_3O^+ que d'ions hydroxyde OH^- . Son $\text{pH} > 7,0$.

► Dans le cas de la réaction d'un acide de formule générale HA sur l'eau, à l'équation de la réaction :



Est associée une constante d'équilibre notée K_A telle que :

$$K_A = \frac{[\text{A}^-] \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{HA}]}$$

Sans dimension (sans unité) et appelée **constante d'acidité** du couple HA/A^- .

Comme pour le produit ionique de l'eau, on définit aussi : $\text{p}K_A = -\log K_A$.

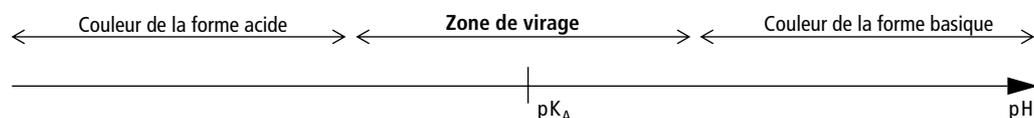
► Soit la réaction acido-basique d'équation :



De constante $K_R = K_{A1}/K_{A2}$.

► Les indicateurs colorés sont des acides ou des bases dont les formes acide et basique conjuguées ont des teintes différentes.

Le **diagramme de prédominance** d'un indicateur présente la particularité de posséder une **zone de virage** : c'est la zone de pH pour laquelle ni la forme acide, ni la forme basique ne sont suffisamment prépondérantes pour imposer leur couleur :



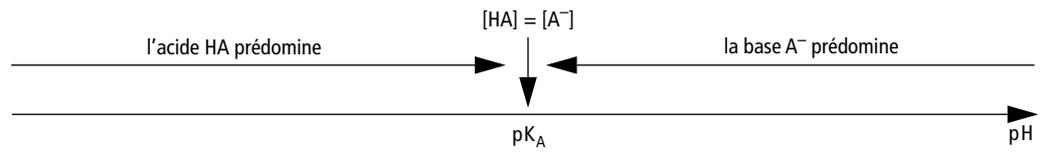
► Dans toute solution aqueuse contenant le couple acide HA/base A^- , on peut écrire l'équilibre :



$$\text{pH} = \text{p}K_A + \log \frac{[\text{A}^-]}{[\text{HA}]}$$

Si $[\text{HA}] = [\text{A}^-]$ alors $\text{pH} = \text{p}K_A$.

Ce qui donne le **diagramme de prédominance** :



► Le titrage d'une espèce chimique est la recherche de sa concentration en solution.

Elle peut se faire, soit par colorimétrie : utilisation d'un indicateur coloré, soit par pHmétrie en repérant le point équivalent par ses coordonnées.

Exercices d'applications

Exercice ❶ Calculs de pH

Calculer le pH des solutions suivantes :

Acide chlorhydrique à $10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, acide nitrique HNO_3 à $5 \cdot 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

Solution d'hydroxyde de sodium à $2 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, à $5 \cdot 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Note : Ces 2 acides et l'hydroxyde de sodium réagissent totalement avec l'eau.

Exercice ❷ Dosage d'une solution d'acide chlorhydrique

❶ On désire préparer par dilution $V = 100 \text{ mL}$ d'une solution d'acide chlorhydrique de concentration $C = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ en partant d'une solution mère de concentration $C = 0,25 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Quel volume V_b de solution mère doit-on utiliser ?

❷ Afin de vérifier si la dilution est correcte, on dose par pHmétrie $V_A = 20,0 \text{ mL}$ de la solution préparée, par une solution d'hydroxyde de sodium de concentration $C_b = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et on constate qu'il faut : $V_b = 25,0 \text{ mL}$ de base pour atteindre l'équivalence.

a) Quelle est la concentration C_A de la solution d'acide chlorhydrique dosée ?

b) Quel volume de solution mère a-t-on en fait réellement utilisé si l'on suppose les autres manipulations correctes ?

❸ Écrire l'équation de la réaction intervenant lors du dosage.

❹ Lors de ce dosage, le pH est de 2,4 après un ajout de solution d'hydroxyde de sodium de $V'_b = 12,5 \text{ mL}$.

Recenser toutes les espèces chimiques présentes en solution.

À quel stade particulier du dosage se situe-t-on ?

Exercice ❸ Réaction acide-base

I. Le pH d'une solution (S) d'acide chlorhydrique de concentration molaire C est mesuré à l'aide d'un pH-mètre. La valeur trouvée est $\text{pH} = 2,1$.

❶ Calculer la concentration molaire C de la solution (S).

❷ La méthode consistant à déterminer la concentration d'une solution à partir de la mesure du pH est-elle précise sachant que la mesure est faite à 0,1 unité de pH près ?

II. ❶ La solution (S) a été fabriquée en dissolvant 50 mL de chlorure d'hydrogène gazeux dans de l'eau pure. La solution obtenue a un volume égal à 250 mL.

Vérifier que la valeur mesurée au pH-mètre est compatible avec le résultat du calcul.

❷ Pour contrôler la concentration de la solution (S), on dose 20,0 mL de (S) avec une solution d'hydroxyde de sodium de concentration $10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. L'équivalence est obtenue pour 16,4 mL de solution d'hydroxyde de sodium versée.

a) Quel est le pH du point d'équivalence ?

- b) Quel indicateur coloré peut convenir pour ce dosage ?
- c) Calculer la concentration de (S) et comparer le résultat obtenu aux valeurs précédentes.
- Volume molaire d'un gaz : $24,5 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$; Température : $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Exercice 4 Acides carboxyliques

L'acide méthanoïque (ou acide formique) est un acide organique $\text{H}-\text{COOH}$; sa base conjuguée est l'ion méthanoate (formiate).

- 1 Écrire l'équation de la réaction correspondant à sa mise en solution dans l'eau et donner l'expression littérale de sa constante d'acidité K_A du couple acide/base ; calculer K_A sachant que : $\text{p}K_a = 3,8$.
- 2 Le $\text{p}K_a$ du couple acide éthanoïque/ion éthanoate est égal à 4,8.
Quel est, des 2 acides, celui qui donne la réaction la plus avancée avec l'eau ?

Exercice 5 Comparaison de quelques acides

Le couple acide méthanoïque/ion méthanoate a pour $\text{p}K_a = 3,8$.

Les affirmations suivantes sont-elles justes ou fausses ?

Justifier la réponse dans chaque cas, sans calcul, mais en écrivant éventuellement des équations de réaction et en rappelant des définitions.

- 1 Une solution d'acide méthanoïque a un pH plus faible qu'une solution d'acide chlorhydrique de même concentration.
- 2 Une solution de méthanoate de sodium est neutre.

Exercice 6 Zones de prédominance

- 1 Tracer, sur un même diagramme, les zones de prédominance des espèces chimiques du couple $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ de $\text{p}K_A : 9,2$, ainsi que celles du couple $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{CH}_3\text{COO}^-$ de $\text{p}K_A : 4,8$.
- 2 On mélange 50 mL de solution de chlorure d'ammonium de concentration $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ avec 50 mL de solution d'éthanoate de sodium à $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Le pH du mélange est égal à 7,0. En vous aidant du diagramme précédent, indiquer les espèces chimiques majoritaires dans ce mélange.

Exercices type bac

Exercice 7 Comment rendre une eau potable ?

La destruction des micro-organismes de l'eau, en vue d'obtenir une eau potable, est d'autant plus efficace que la concentration de la forme non ionisée de l'acide hypochloreux, HClO , est grande. On étudie l'influence du pH de l'eau sur l'action germicide de HClO .

- 1 Écrire l'équation de la réaction entre HClO et l'eau. Donner la formule de la base conjuguée de l'acide hypochloreux.
- 2 On donne la courbe de variation du pH d'une solution de 25 mL d'acide hypochloreux de concentration $C_A = 3 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ en fonction du volume V d'une solution ajoutée de soude (hydroxyde de sodium) de concentration $C_B = 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.



- Calculer le volume V_{Beq} de solution de soude versée à l'équivalence. Vérifier le résultat graphiquement.
- En déduire graphiquement la valeur numérique de la constante pK_a pour le couple acide hypochloreux/ion hypochlorite. On donnera, en quelques mots, la méthode utilisée.
- Quelles sont les concentrations molaires des espèces chimiques présentes à $\text{pH} = 6$? Même question si le pH est égal à 8.
- Calculer le pourcentage de la concentration de la forme non ionisée $[\text{HClO}]$ à $\text{pH} = 6$; puis à $\text{pH} = 8$?

Quelles conclusions peut-on en tirer sur le pH de l'eau que l'on veut rendre potable ?

(À titre d'information, il est indiqué que, l'acide hypochloreux est obtenu par dissolution du chlore dans l'eau. Il est bien précisé que ce point n'intervient pas dans la résolution du problème).

Exercice 8 Constantes de réaction

Le pK_a du couple acide méthanoïque/ion méthanoate a pour valeur 3,8 à 25 °C. On dispose d'un volume $V = 100 \text{ mL}$ de solution de méthanoate de sodium de concentration $C = 6,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Le produit ionique de l'eau à 25 °C est $K_0 = 10^{-14}$.

- Écrire l'équation de la réaction (1) de l'ion méthanoate avec l'eau.
 - Montrer que l'équation (1) est la somme de deux équations que l'on précisera.
 - Calculer la constante K_1 de la réaction (1).
- On ajoute au volume $V = 100 \text{ mL}$ de solution de méthanoate de sodium, un volume V' de solution d'acide chlorhydrique de concentration $C' = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. On obtient une solution S.

 - Écrire l'équation de la réaction (2) qui se produit.
 - Calculer la constante K_2 de la réaction (2).
 - Calculer le volume V' de solution d'acide chlorhydrique à ajouter pour que la concentration en acide méthanoïque soit égale à la concentration en ion méthanoate dans la solution S, en négligeant la réaction de l'acide méthanoïque sur l'eau.
 - Quel est alors le pH de la solution obtenue ?

Exercice 9

Indicateurs colorés

On a tracé, sur le document ci-dessous, les courbes représentatives $\text{pH} = f(V)$ obtenues en mesurant le pH au cours de l'addition progressive d'un volume V d'une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium de concentration $C = 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$:

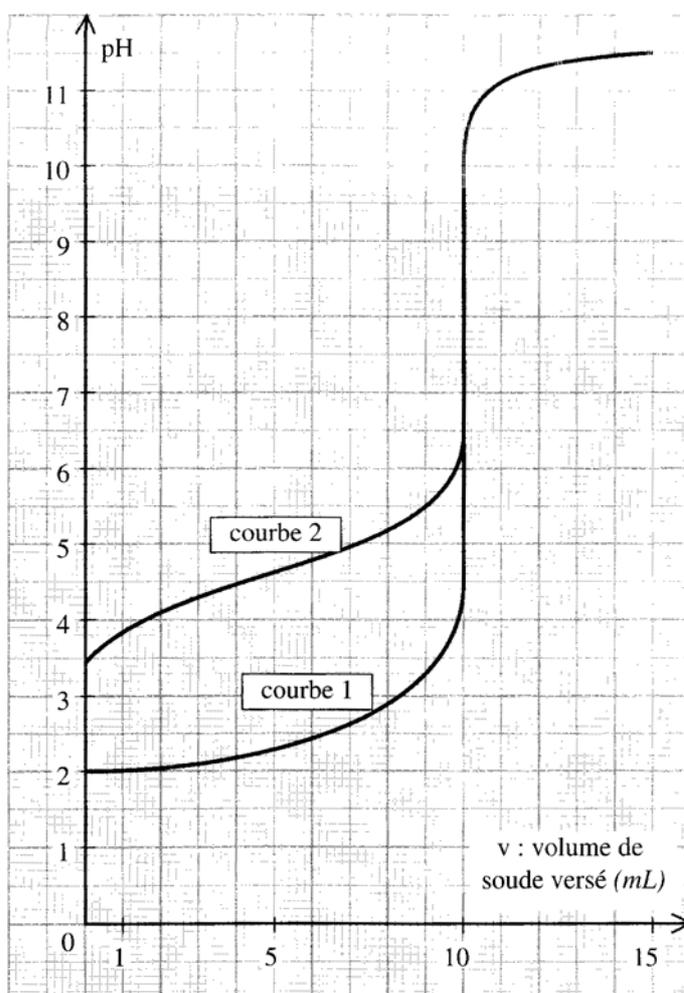
- ❶ À 10 mL d'une solution aqueuse d'un acide noté HA_1 (courbe 1) ;
- ❷ À 10 mL d'une solution aqueuse d'un acide noté HA_2 (courbe 2).

Les 2 acides sont de même concentration initiale.

- a) L'observation de ces 2 courbes permet-elle de prévoir, sans calcul, lequel de ces 2 acides donne avec l'eau la réaction la plus avancée ?
- b) Les 2 courbes sont pratiquement confondues au-delà de l'équivalence ; pourquoi ?
- c) Le tableau ci-dessous donne la zone de virage et le changement de couleur de 3 indicateurs colorés.

Rouge de phénol	7,2	Jaune	6,8 orangé	8,4 rouge
Phénolphthaléine	9,0	Incolore	8,2 rose	10 mauve
Jaune d'alizarine	11,0	Jaune	10,1 violet	12,0 lilas

Quel indicateur coloré paraît le plus approprié à chaque dosage ? Justifier.



Exercice 10 Comparaison de solutions acido-basiques

Les deux parties sont indépendantes

I – Identification de solutions

1 Utilisation d'indicateurs colorés

On dispose de 3 flacons A, B, C, contenant chacun l'une des solutions suivantes, de même concentration molaire volumique C_0 dans les 3 cas :

- ▶ Solution d'acide éthanoïque
- ▶ Solution d'hydroxyde de sodium (ou soude)
- ▶ Solution d'acide chlorhydrique

On cherche à identifier le contenu de chaque flacon.

On dispose de tubes à essais et de deux indicateurs colorés : le bleu de bromothymol et l'hélianthine dont on rappelle les zones de virage à la fin de l'exercice. On réalise des tests colorimétriques dans les tubes à essais avec ces trois solutions

	Bleu de bromothymol	Hélianthine
A	jaune	rouge
B	jaune	rouge
C	bleu	jaune

a) Dans quels domaines de valeurs se situe le pH de chacune des solutions ? Quelle(s) solution(s) peut-on identifier ?

b) Pourquoi, lors des tests, ne doit-on verser dans chaque tube que quelques gouttes de l'indicateur coloré utilisé ?

2 Utilisation d'un pH mètre

Pour permettre d'identifier ces trois solutions, on les dilue cent fois de façon précise et on mesure le pH des solutions diluées.

a) Choisir, dans la liste suivante, la verrerie pour obtenir 100 mL de chacune des solutions diluées :

- ▶ burette graduée 25 mL
- ▶ erlenmeyers 100 mL – 200 mL
- ▶ pipettes jaugées 1 mL – 2 mL – 5 mL – 10 mL – 20 mL
- ▶ béchers 100 mL – 500 mL
- ▶ fioles jaugées 50 mL – 100 mL – 500 mL

b) La mesure du pH des trois solutions diluées donne : $\text{pH}_A = 2,0$; $\text{pH}_B = 2,9$; $\text{pH}_C = 12,0$.

Montrer comment ces résultats permettent d'identifier les 3 solutions A, B et C, sachant que l'acide chlorhydrique est plus dissocié dans l'eau que l'acide éthanoïque.

c) Quelle était la concentration C_0 des solutions initiales ?

II – Comparaison de deux acides

On dispose de deux solutions d'acides notées 1 et 2 d'un certain nombre de renseignements concernant chaque solution :

Solution 1	Solution 2
Acide éthanóique	Monoacide AH
$pK_{A1} = 4,75$	$pK_{A2} = ?$
$C_1 = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	$C_2 = ?$
$pH_1 = 3,1$	$pH_2 = 2,9$

On se propose d'effectuer des mesures qui permettent de savoir par deux méthodes différentes lequel de ces deux acides est le plus dissocié dans l'eau.

❶ Première méthode détermination de C_2

On dose la solution 2 par une solution d'hydroxyde de sodium de concentration $C_B = 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Le volume à doser est $V_2 = 20,0 \text{ mL}$.

L'équivalence est repérée par le virage d'un indicateur coloré, la phénolphtaléine, dont on rappelle la zone de virage en fin d'exercice.

Le volume de solution d'hydroxyde de sodium versé à l'équivalence est $V_{BE} = 10,0 \text{ mL}$.

- Quel changement de couleur a-t-on observé à l'équivalence ?
- Écrire l'équation de la réaction de dosage, définir l'équivalence et calculer C_2 .
- Peut-on en déduire lequel de ces deux acides est le plus dissocié dans l'eau ? Justifier.

❷ Détermination du pK_A du couple de la solution 2

À 20,0 mL de la solution 2, on ajoute le volume de solution d'hydroxyde de sodium nécessaire pour obtenir la demi-équivalence. On mesure le pH et on trouve $pH = 3,75$.

- Quel volume de solution d'hydroxyde de sodium a-t-on versé ?
- Construire un tableau d'avancement de la réaction et exprimer la concentration de chaque espèce en solution en fonction de C_2 et V_2 .
- Lequel de ces deux acides est le plus dissocié dans l'eau ? Justifier.

Zone de virage des indicateurs colorés

Hélianthine	3,6	Rouge 3,1 orangé 4,4 jaune
Bleu de bromothymol	6,8	Jaune 6,0 vert 7,6 bleu
Phénolphtaléine	9,0	Incolore 8,2 rose 10 mauve

Séquence

6

> **Physique :**

La mécanique de Newton

> **Chimie :**

**Sens d'évolution spontanée
d'un système**

Sommaire

Séquence 6

Physique > La mécanique de Newton

Chapitre 1	>	Mouvement d'un corps soumis à des forces extérieures	199
		A Nécessité de choisir un référentiel	
		B Comment décrire le mouvement d'un solide ?	
		C Effet d'une force sur le mouvement	
		D Inventaire des forces extérieures appliquées à un solide	
		E Le principe d'énergie : 1ère loi de Newton	
Chapitre 2	>	Lien entre $\Delta \vec{V}_G$ et $\sum \vec{F}_{ext}$	205
		A Mouvement du centre d'inertie	
		B Relation existant entre la masse m , $\Delta \vec{V}_G$, Δt et $\sum \vec{F}_{ext}$	
		C Le vecteur accélération	
		D Deuxième loi de Newton appliquée au centre d'inertie	
Chapitre 3	>	Le principe des interactions : 3^{ème} loi de Newton	212
Résumé	>	.....	213
Exercices	>	.....	214

Chimie > Sens d'évolution spontanée d'un système

Chapitre 1 > Quotient de réaction Q_r et constante d'équilibre K 221

Chapitre 2 > Sens d'évolution spontanée d'un système chimique 222

A Exemple de réaction acido-basique

B Exemples de réaction d'oxydoréduction

Résumé > 224

Exercices > 225

Physique

Objectifs

- ▶ Savoir faire l'inventaire des forces extérieures appliquées à un système.
- ▶ Connaître la définition du vecteur accélération.
- ▶ Savoir énoncer les trois lois de Newton.

Mouvement d'un corps soumis à des forces extérieures

Pour décrire le mouvement, on utilise la notion de trajectoire et la notion de vecteur vitesse.

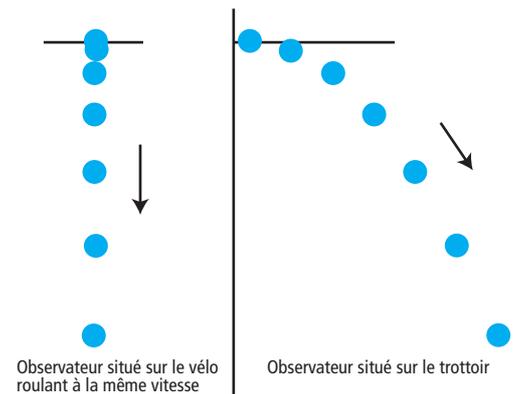
La trajectoire d'un corps est l'ensemble des positions successives occupées par un point du corps ; cette trajectoire dépend de l'observateur choisi comme référence.

A Nécessité de choisir un référentiel

Un enfant se déplace sur un vélo en tenant une balle à la main ; un premier observateur roule à ses côtés à la même vitesse ; un deuxième observateur se trouve sur le trottoir. L'enfant situé sur le vélo lâche la balle sans vitesse initiale ; la trajectoire de la balle n'est pas la même pour les deux observateurs.

Si la balle était filmée par les deux observateurs avec une caméra numérique ; nous obtiendrions les enregistrements ci-contre.

Le mouvement de la balle dépend donc de l'observateur choisi comme référence (celui sur le vélo voisin ou celui sur le trottoir).



Pour décrire le mouvement d'un solide, nous aurons besoin de repérer les différents instants (à l'aide d'une horloge c'est-à-dire d'un repère de temps) et les différentes positions (à l'aide d'un repère d'espace) occupées par un point représentant le solide.

L'ensemble (repère de temps, repère d'espace) étant choisi, nous avons un référentiel qui nous permet de décrire le mouvement.

Pour étudier le mouvement d'objets sur Terre, on utilise le référentiel terrestre.

L'ensemble des objets de référence fixes par rapport à la Terre constituent le référentiel terrestre.

Le référentiel terrestre permet d'étudier des mouvements de courtes durées réalisés sur Terre tels que les mouvements étudiés dans un laboratoire.

Par contre, le référentiel terrestre ne sera pas utilisé pour étudier le mouvement d'un satellite autour de la Terre.

Dans le référentiel terrestre, il existe une infinité de repères d'espace fixes.

Afin de repérer la position d'un point mobile M sur une trajectoire, nous choisirons dans un premier temps, le repère cartésien $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$, ce qui nous donne : $\vec{OM} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$.

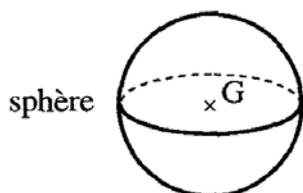
B Comment décrire le mouvement d'un solide ?

Connaître le mouvement d'un solide, c'est connaître le mouvement de chacun de ses points.

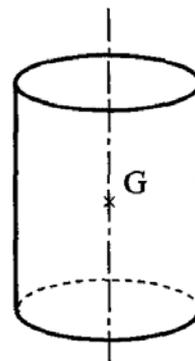
Vous avez vu en 1^{ère} que l'étude, dans le référentiel terrestre, du mouvement d'un solide soumis à la seule action de la Terre montre qu'il existe un point G dont le mouvement est plus simple que les autres : le centre d'inertie.

Pour un solide homogène ayant un centre de symétrie, le centre d'inertie G coïncide avec le centre de symétrie.

Exemples :



cyindre



Dans un référentiel donné, la connaissance de la valeur de la vitesse ne suffit pas pour connaître le mouvement du centre d'inertie du solide. On utilise une grandeur vectorielle : le vecteur vitesse.

Avant de caractériser ce vecteur vitesse \vec{v} , rappelons les définitions de la vitesse moyenne et de la vitesse instantanée.

La vitesse moyenne v d'un corps a été définie comme étant égale au quotient de la distance d parcourue entre deux positions par la durée Δt de son déplacement : $v = \frac{d}{\Delta t}$.

Exemple : la vitesse moyenne d'un point mobile M entre deux dates t_1 et t_2 est égale au quotient de la distance parcourue par la durée du parcours : $v = \frac{\widehat{M_1 M_2}}{t_2 - t_1}$; $\widehat{M_1 M_2}$ est la distance réellement parcourue par M .

La vitesse instantanée d'un corps en mouvement est sa vitesse à l'instant où on l'observe.

Exemple : le compteur d'un véhicule affiche une vitesse instantanée.

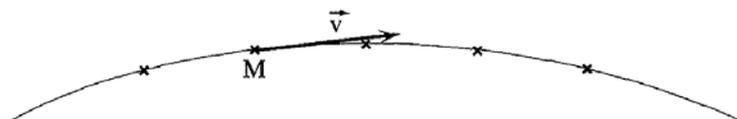
L'unité de vitesse, dans le système international est le mètre par seconde ($m \cdot s^{-1}$) ; le kilomètre par heure ($km \cdot h^{-1}$) est l'unité de vitesse fréquemment utilisée.

Comment déterminer de façon approchée une vitesse instantanée ?

Considérons un point mobile M ; nous avons vu en première S que la vitesse instantanée de ce point à un instant de date t correspond à la vitesse moyenne de ce point entre deux instants voisins.

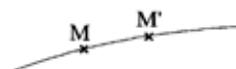
Les caractéristiques du vecteur vitesse \vec{v} sont les suivantes :

- ▶ sa direction est tangente à la trajectoire au point considéré,
- ▶ son sens est celui du mouvement,
- ▶ sa norme est la valeur de la vitesse à l'instant de date t .



Par définition, le vecteur vitesse \vec{v} d'un point M à la date t est la limite,

lorsque t' tend vers t , du quotient : $\frac{\overrightarrow{MM'}}{t' - t}$ où M et M' sont les positions



occupées par le point mobile aux dates t et t' : $\vec{v} = \lim_{t' \rightarrow t} \frac{\overrightarrow{MM'}}{t' - t}$.

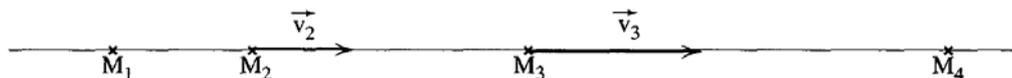
Nous pouvons écrire que \vec{v} est la dérivée par rapport au temps du vecteur position \vec{OM} : $\vec{v} = \frac{d\vec{OM}}{dt}$.

En coordonnées cartésiennes, dans un repère $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$, le vecteur vitesse s'écrit :

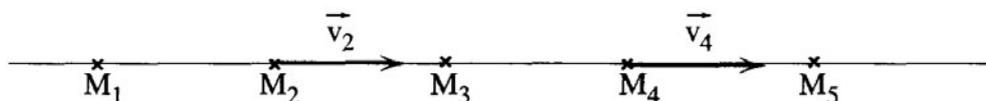
$$\vec{v} = \frac{d\vec{OM}}{dt} = \frac{dx}{dt} \vec{i} + \frac{dy}{dt} \vec{j} + \frac{dz}{dt} \vec{k}.$$

Cas du mouvement rectiligne

La trajectoire est une droite ; le vecteur vitesse garde une direction constante.



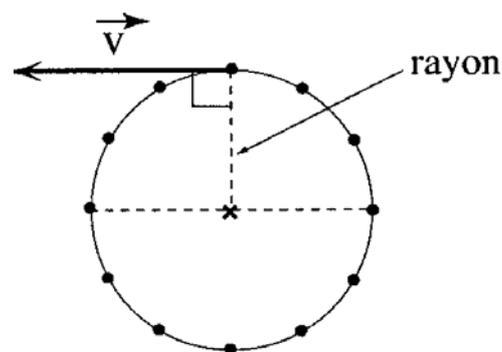
Si le mouvement est rectiligne et uniforme, le vecteur vitesse est un vecteur constant, c'est-à-dire que sa direction, son sens et sa valeur sont constants (voir figure ci-dessous).



Cas du mouvement circulaire

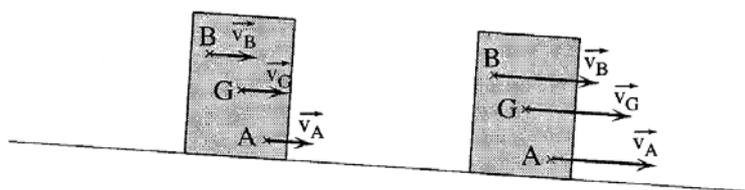
En chaque point de la trajectoire, le vecteur vitesse est perpendiculaire au rayon passant par ce point.

Si le mouvement est circulaire et uniforme, la valeur de la vitesse reste constante.



Cas d'un solide en translation

À chaque instant, les vecteurs vitesse des différents points du solide sont égaux.



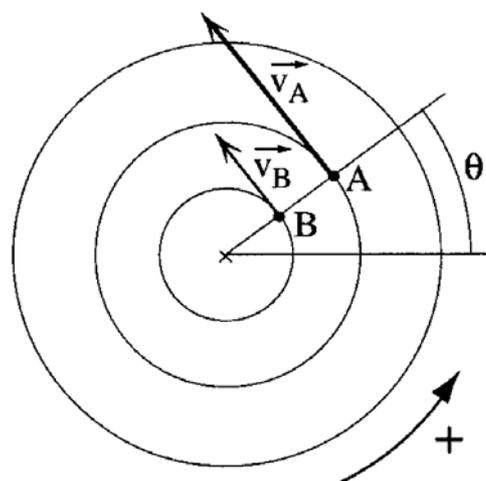
Cas d'un solide en rotation autour d'un axe fixe

Chacun des points du solide décrit une trajectoire circulaire ; les caractéristiques des vecteurs vitesse des points du solide en rotation ne sont pas identiques, par contre la vitesse angulaire de rotation du solide est définie par :

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}.$$

Elle est la même pour A et B puisqu'au même instant les points A et B ont tourné du même angle θ .

Le mouvement de rotation est uniforme si la vitesse angulaire reste constante au cours du mouvement.



Soit ω la vitesse angulaire de rotation du solide autour d'un axe fixe et v la valeur de la vitesse linéaire d'un point situé à une distance r de l'axe ; les deux grandeurs sont liées par la relation $v = r\omega$.

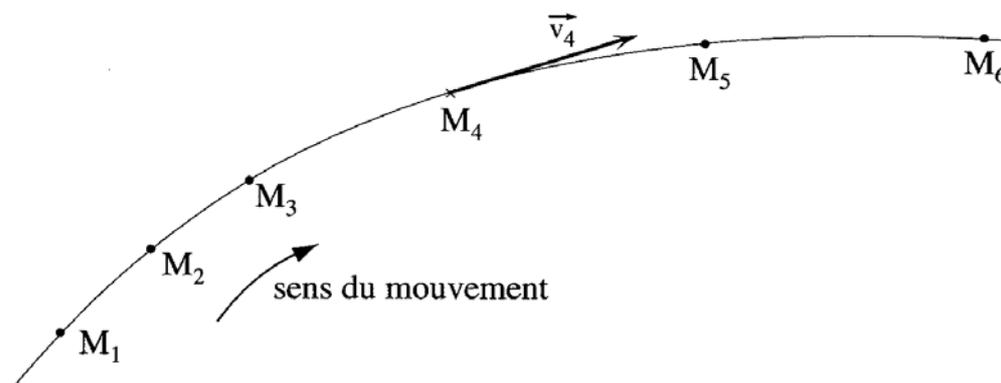
Détermination graphique du vecteur vitesse

Sur l'enregistrement ci-dessous, déterminons le vecteur vitesse du point M_4 ; l'intervalle de temps τ séparant les enregistrements des points consécutifs est 60 ms.

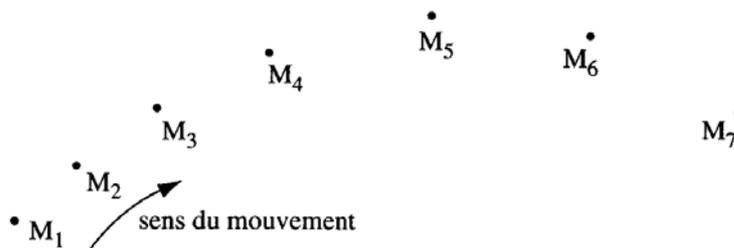
Cet intervalle de temps étant faible, nous admettons que la vitesse moyenne calculée sur l'intervalle de temps $[t_3, t_5]$ est très voisine de la vitesse instantanée de M_4 :

$$v_4 = \frac{\overline{M_3M_5}}{t_5 - t_3} = \frac{\overline{M_3M_5}}{2\tau} = 0,52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Pour représenter le vecteur vitesse, il suffit de choisir une échelle : 1 cm correspond à $0,20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



Activité 1 Sur l'enregistrement ci-dessous, déterminer et représenter le vecteur vitesse du point M_5 ; l'intervalle de temps τ séparant les enregistrements des points consécutifs est 60 ms.



C Effet d'une force sur le mouvement

En seconde, vous avez vu qu'une force qui s'exerce sur un corps peut modifier : soit la valeur de sa vitesse, soit la forme de sa trajectoire, soit les deux à la fois.

Cette modification dépend généralement de la masse du corps ; en général, l'effet d'une force sur le mouvement d'un corps est d'autant plus faible que la masse du corps est grande.

Exemple : si l'on exerce deux forces identiques de direction horizontale sur deux patineurs de masses différentes immobiles sur la glace d'une patinoire, le patineur le plus léger est mis en mouvement avec une vitesse plus grande que celle de l'autre patineur.

En 1^{ère} S vous avez vu que la force est liée à la variation du vecteur vitesse et non au vecteur vitesse.

Nous allons étudier dans la suite du cours des solides soumis à plusieurs actions simultanées, le cas du solide en translation étant privilégié.

Le mouvement du centre d'inertie d'un solide représentera donc le mouvement de tous les points du solide en translation.

D Inventaire des forces extérieures appliquées à un solide

L'objet étudié sera appelé système ; tous les autres objets en interaction avec le système exercent des actions dites extérieures que nous modéliserons par des forces extérieures et leurs vecteurs force associés.

Donner le bilan des forces extérieures appliquées au système consistera à énoncer et à représenter sur un schéma les forces extérieures non négligeables (dans la mesure où les données le permettent).

Nous utiliserons la méthode suivante :

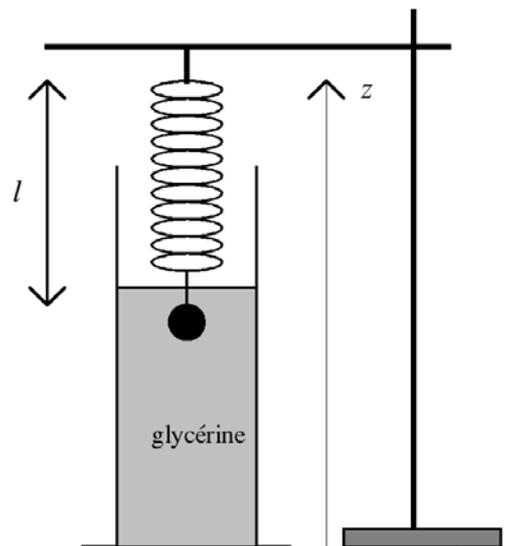
- définir le système étudié (il est vivement conseillé de faire un schéma où le système pourra être entouré) ;
- identifier les interactions de contact ;
- identifier les interactions à distance ;
- modéliser les actions agissant sur le système et conserver les forces non négligeables ;
- récapituler les forces et les représenter sur le schéma précédent (si vous possédez suffisamment de renseignements sur ces vecteurs force).

Le bilan des forces extérieures appliquées à un système va nous permettre de déterminer le vecteur $\sum \vec{F}_{\text{ext}}$ qui représente la somme vectorielle des forces extérieures agissant sur le système ; ce vecteur nous sera très utile par la suite.

Activité 2 *Considérons une bille en acier (de masse m , de volume V) accrochée à un ressort (de constante de raideur k et de longueur à vide ℓ_0) qui se déplace vers le bas dans de la glycérine (de masse volumique ρ) ; la longueur ℓ du ressort est alors supérieure à ℓ_0 .*

La glycérine exerce une force de frottement sur la bille : $\vec{f} = -h\vec{v}$ où \vec{v} est le vecteur vitesse de la bille.

Faire l'inventaire des forces appliquées à la bille, représenter ces forces sur un schéma et donner l'expression de $\sum \vec{F}_{\text{ext}}$ en fonction de $m, h, v, V, g, \rho, k, \ell, \ell_0$ et du vecteur unitaire \vec{u}_z .



E Le principe d'inertie : 1^{ère} loi de Newton

Activité 3 1 Recherchez dans un dictionnaire ce que signifie le mot inertie et notez sa définition ci-dessous.

2 Recherchez dans votre cours de seconde l'énoncé du principe d'inertie et notez-le ci-dessous.

L'expérience montre qu'il est plus difficile de mettre en mouvement une boule de pétanque qu'une balle de tennis ; on dit que la boule de pétanque présente une inertie différente de la balle de tennis.

De même, il sera plus difficile de modifier la vitesse d'un corps de masse importante que celle d'un corps de masse plus faible.

Un corps peut-il être en mouvement sans qu'il ne soit soumis à aucune force ?

Newton (1642-1727) considérait qu'il pouvait y avoir mouvement sans force et avait énoncé le principe d'inertie. Cependant à la surface de la Terre, tous les corps sont soumis à une force exercée par la Terre qui s'appelle le poids ; il n'existe donc pas de mouvement sans force exercée sur un corps à la surface de la Terre.

1^{ère} loi de Newton appliquée au centre d'inertie

Le centre d'inertie d'un solide mécaniquement isolé

- s'il est immobile, reste immobile,
- s'il est en mouvement, est animé d'un mouvement rectiligne et uniforme.

Le principe d'inertie ne s'applique que dans des référentiels particuliers appelés référentiels galiléens.

Pour appliquer le principe d'inertie, il faudra que les référentiels puissent être considérés comme galiléens. Nous admettrons que le référentiel terrestre pourra être considéré comme galiléen avec une bonne approximation pour les expériences ou exercices de ce chapitre.

Par définition, un solide mécaniquement isolé n'est soumis à aucune action mécanique extérieure. Or dans l'Univers, tout solide est soumis à des forces d'interaction gravitationnelle, ce solide isolé est donc un modèle. On peut néanmoins se rapprocher de ce modèle de manière satisfaisante, notamment dans le cas d'un solide soumis à des actions extérieures qui se compensent, ce qui revient à dire que la somme vectorielle des forces extérieures exercées sur le solide en mouvement reste égale au vecteur nul ($\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{0}$).

Lorsque les forces qui agissent sur un corps se compensent ($\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{0}$), son mouvement sera identique à celui d'un corps qui n'est soumis à aucune force.

Conséquences du principe d'inertie

Dans le référentiel terrestre, lorsque le mouvement d'un corps est rectiligne et uniforme, on pourra conclure que ce corps est soumis à des forces qui se compensent ($\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{0}$).

Exemple :

En absence de vent, le mouvement d'un parachutiste est pratiquement rectiligne et uniforme car le poids du parachutiste et la force exercée par l'air se compensent.

Dans le référentiel terrestre, lorsque la trajectoire d'un corps n'est pas une droite, on peut conclure, d'après le principe d'inertie, que les forces exercées sur ce corps ne se compensent pas.

De même, lorsque la valeur de la vitesse d'un corps n'est pas constante, on peut conclure, d'après le principe d'inertie, que les forces exercées sur ce corps ne se compensent pas.

A Mouvement du centre d'inertie

Dans le référentiel terrestre considéré comme galiléen, nous pouvons appliquer le principe d'inertie aux solides se rapprochant du modèle du solide mécaniquement isolé, c'est-à-dire aux solides soumis uniquement à des actions extérieures qui se compensent ; la somme vectorielle $\sum \vec{F}_{ext}$ des forces extérieures appliquées sur le solide en mouvement reste alors égale au vecteur nul.

Exemple :

Au laboratoire, il est possible de vérifier avec une bonne approximation le principe d'inertie on utilise un mobile autoporteur qui est un mobile sur coussin d'air.

► Inventaire des forces extérieures agissant sur le mobile autoporteur :

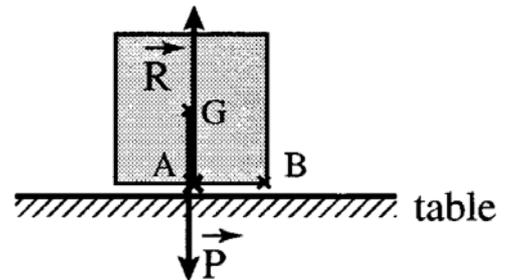
\vec{R} : force exercée par le coussin d'air en A,

\vec{P} : poids du système appliqué en G, centre d'inertie du palet.

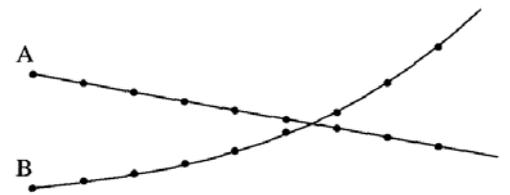
Les forces sont représentées sur la figure ci-contre.

La somme vectorielle des forces extérieures agissant sur le mobile s'écrit donc : $\sum \vec{F}_{ext} = \vec{R} + \vec{P}$.

L'appareil a été conçu pour qu'il n'y ait pratiquement pas de frottements ; cette somme vectorielle est donc pratiquement nulle lorsque la table est horizontale.



Activité 4 Dans le référentiel du laboratoire considéré comme galiléen, le mobile autoporteur est lancé de façon quelconque sur une table horizontale ; le mobile est muni de deux éclateurs : un éclateur A situé sur l'axe du cylindre et un autre B situé à la périphérie du mobile ; on obtient l'enregistrement ci-contre :



→ Quel est le mouvement du point A ? Que faut-il en conclure ?

Quel est le mouvement du centre d'inertie lorsque $\sum \vec{F}_{ext} \neq \vec{0}$?

Dans le cas du point B, le vecteur vitesse \vec{v}_G du centre d'inertie G ne reste pas constant.

En fait, il existe une relation entre la variation $\Delta \vec{v}_G$ du vecteur vitesse \vec{v}_G du centre d'inertie G du solide et la somme vectorielle des forces extérieures $\sum \vec{F}_{ext}$ agissant sur le solide.

Dans un référentiel galiléen, lorsque $\sum \vec{F}_{ext} \neq \vec{0}$, $\Delta \vec{v}_G$ et $\sum \vec{F}_{ext}$ ont même direction et même sens ; le mouvement du centre d'inertie G est donc régi par la somme des forces extérieures agissant sur le système.

Nous allons rechercher la relation existant entre les vecteurs $\Delta \vec{v}_G$ et $\sum \vec{F}_{ext}$.

B

Relation existant entre la masse m , $\Delta \vec{v}_G$, Δt et

$$\sum \vec{F}_{ext}$$

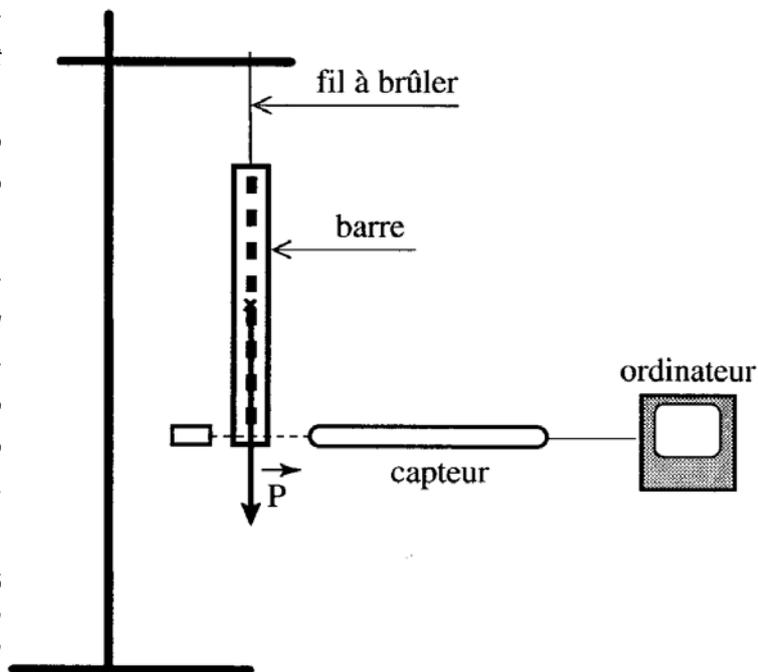
Activité 5 Afin de préciser la relation vectorielle existant entre $\sum \vec{F}_{ext}$ et $\Delta \vec{v}_G$, étudions la chute libre d'une barre de centre d'inertie G .

L'enregistrement sur ordinateur des vitesses du solide en translation rectiligne permettra de déterminer la valeur de $\Delta \vec{v}_G$ à différents instants.

Le logiciel utilisé a donné la vitesse de translation du solide v_G , en fonction de t :

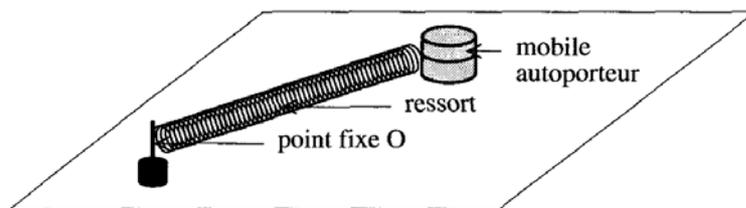
$$v_G = 9,8t + 0,1.$$

- 1 Faire le bilan des forces extérieures agissant sur la barre (l'action de l'air est négligeable compte tenu du choix de la barre) et exprimer $\sum \vec{F}_{ext}$.
- 2 Rechercher une relation existant entre la valeur de $\Delta \vec{v}_G$ et l'intervalle de temps Δt .
- 3 Rechercher une relation existant entre m , $\Delta \vec{v}_G$, Δt et $\sum \vec{F}_{ext}$ et noter la réponse dans le cadre ci-dessous.



Activité 6

On veut préciser la relation vectorielle existant entre m , $\Delta \vec{v}_G$, Δt et $\sum \vec{F}_{ext}$. Pour cela, on utilise un mobile autoporteur S relié à un point fixe O par l'intermédiaire d'un ressort à spires non jointives et à réponse linéaire. Le mobile repose sur une table horizontale et l'ensemble est représenté sur les figures ci-dessous.



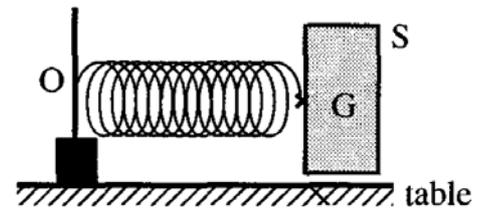
dispositif vu de dessus

Le ressort étant « à vide », c'est-à-dire ni tendu, ni comprimé, on enregistre la position B de la projection du centre d'inertie G de S.

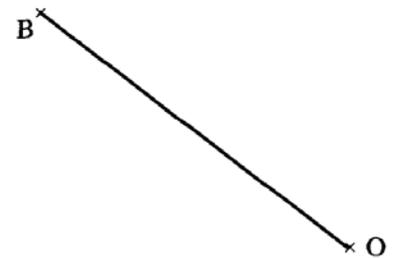
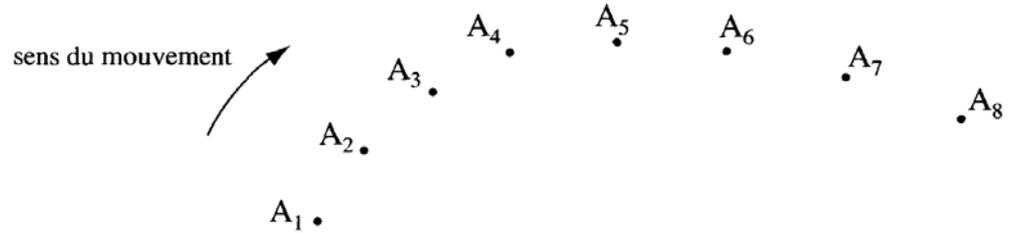
On tire sur le ressort, dont l'axe reste parallèle à la table et on lance le mobile.

On enregistre à intervalles de temps successifs τ , les projections A_i des positions successives du centre d'inertie G. On obtient finalement un enregistrement dont une réduction est fournie.

On a noté A_i la position à la date t_1 , A_2 la position à la date t_2 , ... La masse du solide est m ($m = 0,600 \text{ kg}$) et l'intervalle de temps τ est égal à $6 \cdot 10^{-2} \text{ s}$; la constante de raideur du ressort est k ($k = 11 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$).



profil schématisé du dispositif



❶ Faire le bilan des forces extérieures agissant sur le mobile autoporteur et exprimer $\sum \vec{F}_{ext}$. Donner les caractéristiques de ce vecteur à la date t_4 et représenter ce vecteur en A_4 .

❷ Donner les caractéristiques de ce vecteur $m \frac{\Delta \vec{V}_G}{\Delta t}$ à la date t_4 et représenter ce vecteur en A_4 .

❸ Comparer $\sum \vec{F}_{ext}$ et $m \frac{\Delta \vec{V}_G}{\Delta t}$. Noter votre réponse dans le cadre ci-dessous.

C Le vecteur accélération

Lorsque Δt tend vers zéro, le vecteur $\frac{\Delta \vec{v}_G}{\Delta t}$ tend vers une grandeur que l'on appelle accélération.

Par définition le vecteur accélération \vec{a} d'un point M à la date t est la limite, lorsque t' tend vers t, du quotient $\frac{\vec{v}' - \vec{v}}{t' - t}$ où \vec{v} et \vec{v}' sont les vecteurs vitesses du point mobile aux dates t et t' :

$$\vec{a} = \lim_{t' \rightarrow t} \frac{\vec{v}' - \vec{v}}{t' - t}.$$

Nous pouvons écrire que \vec{a} est la dérivée par rapport au temps du vecteur vitesse \vec{v} : $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$. En coordonnées cartésiennes, dans un repère $(O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$, le vecteur accélération s'écrit :

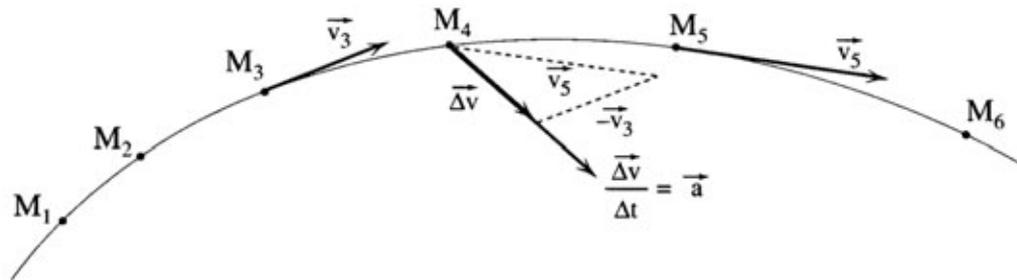
$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2 \vec{OM}}{dt^2} = \frac{d^2 x}{dt^2} \vec{i} + \frac{d^2 y}{dt^2} \vec{j} + \frac{d^2 z}{dt^2} \vec{k}.$$

Unité de la valeur du vecteur accélération \vec{a} : $m \cdot s^{-2}$.

L'accélération du centre d'inertie G est définie par $\vec{a}_G = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}_G}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}_G}{dt}$.

→ Détermination graphique du vecteur accélération d'un point mobile

Sur l'enregistrement ci-dessous, nous avons déterminé le vecteur accélération du point M_4 ; l'intervalle de temps τ séparant les enregistrements des points consécutifs est 60 ms.



Par définition : $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$;

nous aurons une bonne approximation de \vec{a} à la date t_4 en déterminant le vecteur $\frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ à cette date où $\Delta \vec{v}$ est le vecteur variation de vitesse du point mobile considéré.

Recherchons quelles sont les caractéristiques (direction, sens, valeur) de cette variation du vecteur vitesse dans l'intervalle de temps $[t_3 ; t_5]$. À la date t_4 : $\Delta \vec{v} = \vec{v}_5 - \vec{v}_3$.

La valeur de τ est suffisamment petite pour que l'on puisse confondre vitesse instantanée à la date t_i et vitesse moyenne sur l'intervalle de temps $[t_{i-1} ; t_{i+1}]$.

$$v_5 = \frac{\widehat{M_4 M_6}}{2\tau} = 0,58 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} ; \quad v_3 = \frac{\widehat{M_2 M_4}}{2\tau} = 0,37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

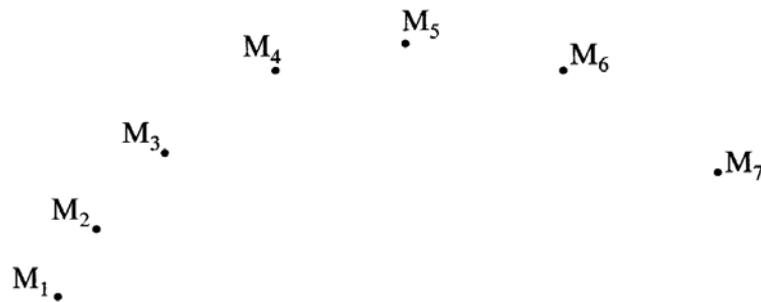
Les vecteurs \vec{v}_3 et \vec{v}_5 sont représentés sur la figure ci-dessus (échelle : 1 cm correspond à $0,20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).

La construction graphique $\Delta \vec{v} = \vec{v}_5 - \vec{v}_3$ nous donne la direction, le sens et la valeur de $\Delta \vec{v}$.

$$\Delta v = 0,32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \Rightarrow \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\Delta v}{2\tau} = 2,67 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \quad \text{soit} \quad a = 2,67 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

Représentons $\frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ sur la figure ci-dessus (échelle 1 cm correspond à $1,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$) ; ce vecteur représente le vecteur accélération \vec{a} du point M_4 .

Activité 7 Sur l'enregistrement ci-dessous, déterminer et représenter le vecteur accélération du point M_5 ; l'intervalle de temps τ séparant les enregistrements des points consécutifs est 60 ms.



D Deuxième loi de Newton appliquée au centre d'inertie

Cette loi a été énoncée par Newton pour un modèle : le point matériel ; un point matériel est un objet de très petite dimension pouvant être considéré comme un point.

Dans un référentiel galiléen, la somme vectorielle des forces $\sum \vec{F}_{\text{ext}}$ qui s'exercent sur un point matériel est égale à la dérivée par rapport au temps du vecteur $m\vec{v}_G$: $\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \frac{d(m\vec{v}_G)}{dt}$.

Si la masse m est constante, cette relation devient : $\sum \vec{F}_{\text{ext}} = m \frac{d\vec{v}_G}{dt} = m\vec{a}_G$.

La 2^{ème} loi de Newton, appelée relation fondamentale de la dynamique, ne s'applique que pour un point matériel ; comment connaître le mouvement d'un solide qui n'est pas modélisable par un point matériel ?

Le théorème du centre d'inertie permet d'appliquer la deuxième loi de Newton au centre d'inertie.

Dans un référentiel galiléen, la somme vectorielle des forces extérieures $\sum \vec{F}_{\text{ext}}$ qui s'exercent sur un solide de masse constante est égale au produit de sa masse par le vecteur accélération \vec{a}_G de son centre d'inertie : $\sum \vec{F}_{\text{ext}} = m\vec{a}_G$.

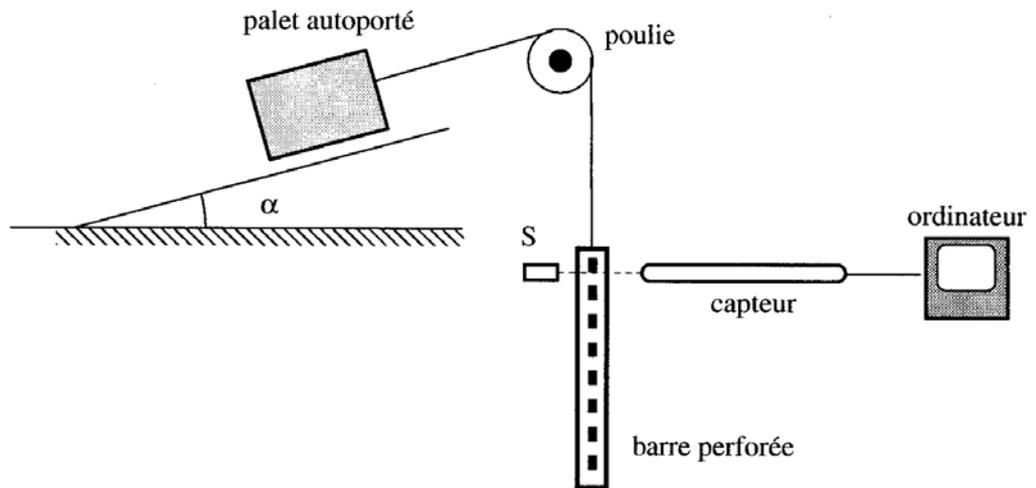
La plupart des solides que nous étudions dans ce cours ont un mouvement de translation ; il suffira de connaître le mouvement du centre d'inertie G pour connaître le mouvement des autres points du solide.

Méthode d'application du théorème du centre d'inertie

- ▶ Définir le système.
- ▶ Préciser le référentiel galiléen (ou considéré comme galiléen) utilisé.
- ▶ Faire le bilan des forces extérieures non négligeables appliquées au système.
- ▶ Écrire la 2^{ème} loi de Newton appliquée au centre d'inertie.
- ▶ Exploiter la relation vectorielle obtenue :
 - soit en projetant dans un repère,
 - soit par une résolution graphique.

Activité 8

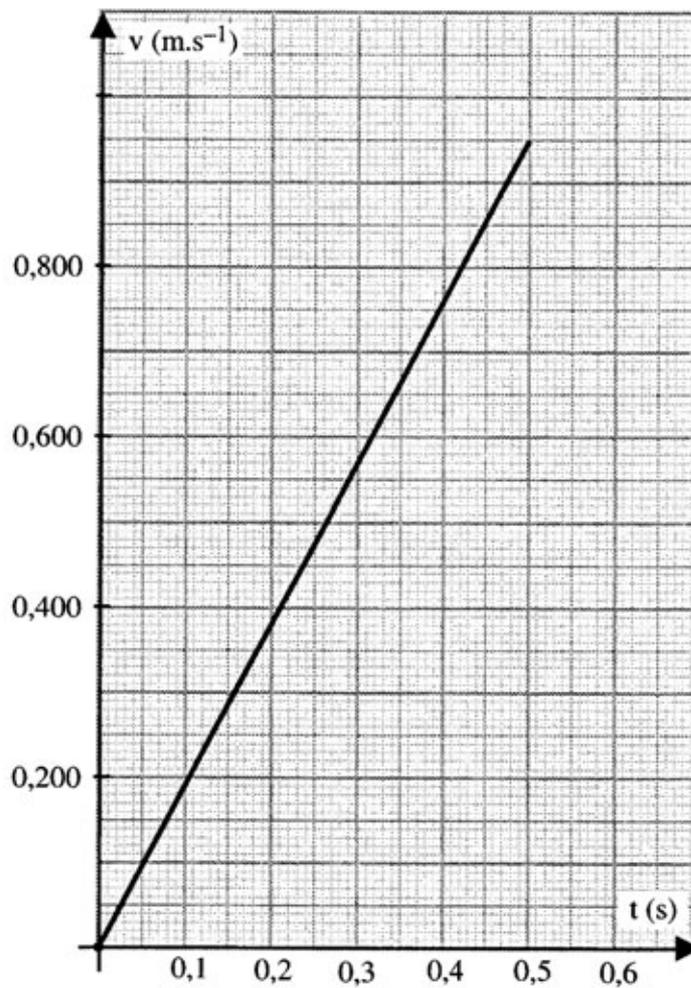
Pour étudier le mouvement d'un palet auto-porté sur un plan incliné, une barre métallique percée de fentes équidistantes est fixée au palet par l'intermédiaire d'un fil inextensible et de masse négligeable.



On souhaite calculer l'angle α entre le plan incliné et l'horizontale, en utilisant les résultats expérimentaux et la 2^{ème} loi de Newton appliquée au centre d'inertie.

Pour toute l'expérience, les approximations suivantes sont admises :

- la masse de la barre perforée ($m' = 34 \text{ g}$) est négligeable devant celle du palet ($m = 712 \text{ g}$) ;
- la poulie, de masse négligeable, tourne sans frottements autour de son axe.



Le déplacement, vertical vers le haut, de la barre perforée entre une source lumineuse S et le capteur, relié à un ordinateur, permet de relever automatiquement les instants de passage des fentes équidistantes devant le capteur. L'ordinateur calcule alors les vitesses instantanées $v(t)$ et trace le graphe de la variation de v en fonction du temps.

$$g = 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

❶ Faire le bilan des forces extérieures agissant sur le palet.

Appliquer la 2^{ème} loi de Newton au centre d'inertie G du palet ; en déduire une relation entre m , a_G , g , $\sin \alpha$ et T valeur de la force exercée par le fil sur le palet.

❷ Faire le bilan des forces extérieures agissant sur la barre.

Appliquer la 2^{ème} loi de Newton au centre d'inertie G' de la barre ; en déduire une relation entre m' , $a_{G'}$, g et T' valeur de la force exercée par le fil sur la barre.

❸ Déterminer à partir de la courbe donnée la valeur de l'accélération de la barre.

❹ En déduire l'expression de $\sin \alpha$ puis calculer l'angle α (on montrera que $T = T'$ et $a_G = a_{G'}$).

On dit que deux corps A et B sont en interaction si l'état de mouvement ou de repos de l'un (A) dépend de l'existence de l'autre (B). Une interaction entre deux corps A et B suppose toujours deux actions réciproques : celle de A sur B et celle de B sur A.

Énoncé du principe des interactions (3^{ème} loi de Newton)

Étant donnés deux solides A et B en interaction ; soit $\vec{F}_{A \rightarrow B}$ la force exercée par A sur B et soit $\vec{F}_{B \rightarrow A}$ la force exercée par B sur A ; au même instant, les forces $\vec{F}_{A \rightarrow B}$ et $\vec{F}_{B \rightarrow A}$ sont telles que : $\vec{F}_{A \rightarrow B} + \vec{F}_{B \rightarrow A} = \vec{0}$; ces deux vecteurs force ont même droite d'action.

Remarque :

La relation vectorielle $\vec{F}_{A \rightarrow B} = -\vec{F}_{B \rightarrow A}$ signifie que les deux vecteurs force sont opposés et que ces forces ont même valeur.

Le principe des interactions est vérifié quel que soit le type d'interaction (de contact ou à distance) et quels que soient les mouvements de A et B.

Remarque :

Ce principe n'est valable en toute rigueur que pour des points matériels (un point matériel est un objet de très petite taille) mais nous pourrons l'utiliser par la suite pour tous les solides rencontrés dans ce cours.

Activité 9 On considère une bille en verre (b) posée sur une table (t).

- ① Quelle est la force réciproque de la force $\vec{R}_{t \rightarrow b}$ exercée par la table sur la bille ?
- ② Quelle est la force réciproque de la force exercée par la Terre sur la bille ?
- ③ La force exercée par la table sur la bille $\vec{R}_{t \rightarrow b}$ est-elle reliée au poids \vec{P} de la bille par le principe des interactions ?
- ④ La bille exerce une action sur la table et la table exerce une action sur la bille ; si la bille roule sur la table, les deux actions précédentes vérifient-elles le principe des interactions ?

Résumé

1^{ère} loi de Newton appliquée au centre d'inertie

Le centre d'inertie d'un solide mécaniquement isolé :

- s'il est immobile, reste immobile,
- s'il est en mouvement, est animé d'un mouvement rectiligne et uniforme.

Le principe d'inertie ne s'applique que dans des référentiels particuliers appelés référentiels galiléens.

L'accélération du centre d'inertie G est définie par $\vec{a}_G = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}_G}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}_G}{dt}$.

Unité de l'accélération \vec{a} : $m \cdot s^{-2}$.

2^{ème} loi de Newton appliquée au centre d'inertie

Dans un référentiel galiléen, la somme vectorielle des forces extérieures $\sum \vec{F}_{\text{ext}}$ qui s'exercent sur un solide de masse constante est égale au produit de sa masse par le vecteur accélération \vec{a}_G de son centre d'inertie : $\sum \vec{F}_{\text{ext}} = m \vec{a}_G$.

Énoncé du principe des interactions (3^{ème} loi de Newton)

Étant donnés deux solides A et B en interaction ; soit $\vec{F}_{A \rightarrow B}$ la force exercée par A sur B et soit $\vec{F}_{B \rightarrow A}$ la force exercée par B sur A ; au même instant, les forces $\vec{F}_{A \rightarrow B}$ et $\vec{F}_{B \rightarrow A}$ sont telles que : $\vec{F}_{A \rightarrow B} + \vec{F}_{B \rightarrow A} = \vec{0}$; ces deux vecteurs force ont même droite d'action.

E

xercices

Exercice ❶ Vrai ou faux

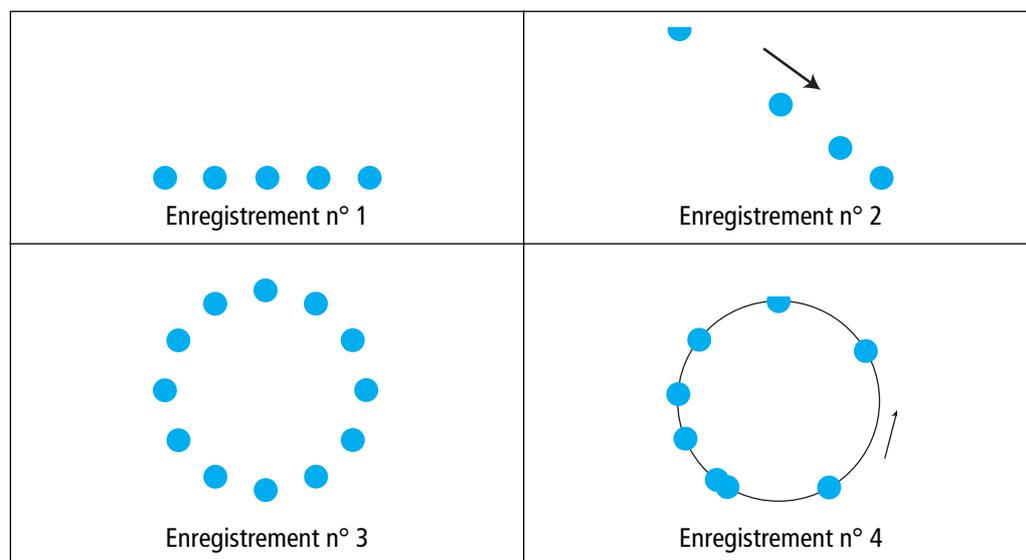
- ❶ En un point M d'une trajectoire, le vecteur accélération est toujours tangent à cette trajectoire.
- ❷ Dans un référentiel galiléen, si un solide en mouvement est soumis à des forces extérieures telles que leur somme vectorielle est égale au vecteur nul ; ce solide a un mouvement rectiligne et uniforme.
- ❸ Dans un solide en mouvement de translation, l'accélération des points du solide autres que le centre d'inertie est la même que celle du centre d'inertie.
- ❹ Le principe des interactions n'est pas vérifié lorsque les solides A et B sont en mouvement.
- ❺ La force réciproque de la poussée d'Archimède exercée sur un solide immergé est le poids de ce solide.

Exercice ❷ Lois de Newton

Énoncer les trois lois de Newton.

Exercice ❸ Le mouvement

Quatre enregistrements de mouvements sont proposés ; décrire ces quatre mouvements en utilisant les termes uniforme, rectiligne, circulaire ou non uniforme.



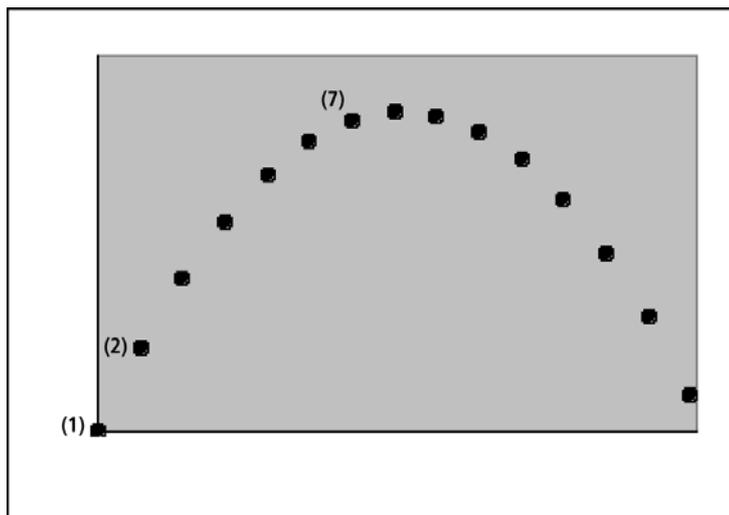
Exercice ❹ Vitesse moyenne et vitesse instantanée

On étudie le mouvement d'une balle (voir la reproduction ci-dessous) ; l'intervalle de temps existant entre deux positions enregistrées est 0,1 s.

- a) La valeur de la vitesse instantanée de la balle augmente-t-elle ou diminue-t-elle de la position (1) à la position (7) ?
- b) Nous admettons que la valeur de la vitesse instantanée lorsque la balle est en position (3) est donnée avec une bonne approximation par la valeur de la vitesse moyenne calculée entre les deux positions voisines (2) et (4) encadrant la position (3).

Échelle : 1 cm correspond à 2 m.

Calculer la valeur de la vitesse instantanée de la balle lorsque la balle est en position 3 puis en position 7. Retrouve-t-on la réponse de la question a ?



Exercice 5 Force exercée par un ressort

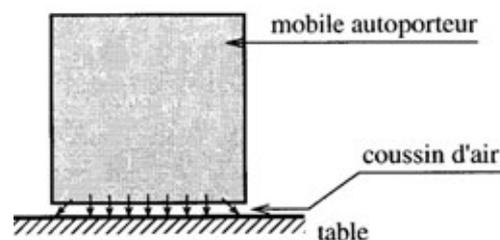
Considérons un cylindre de masse m suspendu à un ressort à spires non jointives ; le ressort a une constante de raideur k , une longueur à vide ℓ_0 et une longueur ℓ lorsque le cylindre y est accroché.

Données : $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; $m = 200 \text{ g}$; $k = 16 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$; $\ell_0 = 10 \text{ cm}$; $\ell = 22,3 \text{ cm}$.

- 1 Le fait de savoir que le ressort est à spires non jointives est-il important ?
- 2 Donner les caractéristiques du vecteur force modélisant l'action du ressort sur le cylindre.
- 3 Donner les caractéristiques du vecteur force représentant les actions réparties de la Terre sur l'objet.

Exercice 6 Mobile autoporteur

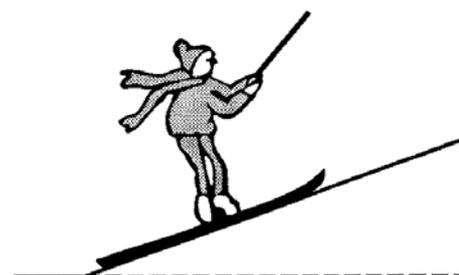
- 1 Faire le bilan des forces extérieures appliquées à un mobile autoporteur placé sur une table horizontale.
- 2 Représenter sur un schéma différent la force exercée par le mobile autoporteur sur le coussin d'air.



Exercice 7 Skieur

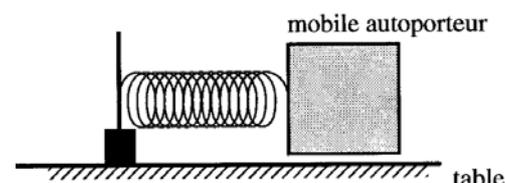
Un skieur utilisant un remontepente a un mouvement rectiligne et une vitesse constante.

- 1 Faire le bilan des forces extérieures agissant sur le skieur.
- 2 Que peut-on dire de la somme vectorielle des forces extérieures agissant sur le skieur ?



Exercice 8 Ressort horizontal

Un ressort horizontal à spires non jointives a une longueur à vide ℓ_0 ($\ell_0 = 15 \text{ cm}$) et une constante de raideur k ($k = 30 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$) ; une de ses extrémités est fixée sur une table horizontale ; l'autre est reliée à un mobile autoporteur.

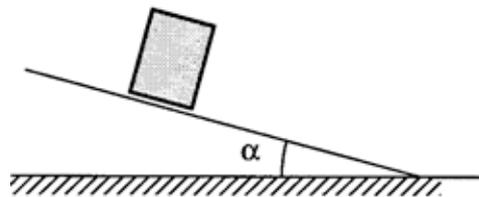


À un instant de date t , la longueur ℓ du ressort est de 20 centimètres. Déterminer les caractéristiques de la force exercée par le mobile autoporteur sur le ressort ; représenter cette force sur un schéma.

Exercice 9 Vecteur accélération d'un objet sur un plan incliné

Un objet de masse m se déplace sans frottement sur un plan incliné (l'objet descend) ; ce plan est incliné d'un angle α par rapport au plan horizontal.

Exprimer les caractéristiques du vecteur accélération \vec{a}_G , du centre d'inertie. (On donnera la valeur de \vec{a}_G , en fonction de g et α .)

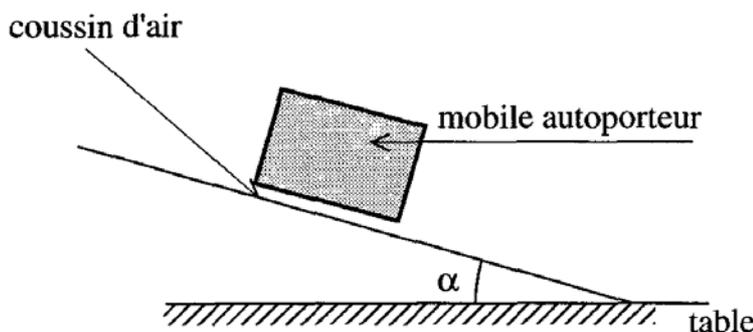


Exercice 10 Équilibre d'un solide

Dans un référentiel considéré comme galiléen, quelle condition nécessaire doivent vérifier les forces extérieures appliquées à un solide pour que celui-ci soit en équilibre (on utilisera le théorème du centre d'inertie) ? Pourquoi cette condition n'est-elle pas suffisante ?

Exercice 11 Détermination d'un coefficient de frottement

On abandonne sans vitesse initiale un mobile autoporteur sur une table inclinée d'un angle α , par rapport à l'horizontale (voir schéma), et on enregistre sur la feuille posée sur cette table le mouvement du centre d'inertie du mobile.



Les marquages ont lieu régulièrement toutes les 60 ms ; cette durée sera appelée τ dans le problème. Le repère d'étude aura pour origine O , position du point quand le mobile est abandonné et pour vecteur de base \vec{i} un vecteur unitaire porté par la trajectoire et orienté dans le sens du mouvement. À partir d'une date t correspondant au marquage de l'un des points de l'enregistrement, on détermine, pour chaque date indiquée dans le tableau ci-dessous, la grandeur v définie par $\vec{v} = v\vec{i}$ avec \vec{v} vecteur vitesse du mobile à la date considérée (v en $m \cdot s^{-1}$).

date	t	$t + T$	$t + 2T$	$t + 3T$	$t + 4T$	$t + 5T$	$t + 6T$
v	0,395	0,412	0,429	0,446	0,463	0,479	0,497

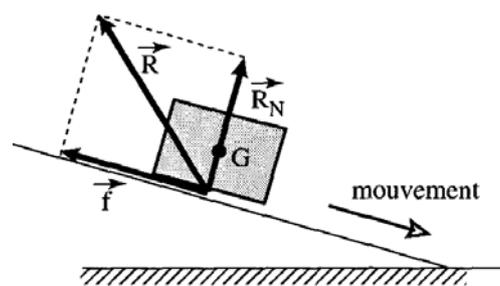
1 a) Pour trouver la forme de $v = f(t)$, construire le graphe de v sur l'intervalle $[t, t + 6T]$ sur papier millimétré.

b) En déduire les caractéristiques du vecteur accélération à partir de sa définition.

Quelle est la nature du mouvement ?

2 Par application du théorème du centre d'inertie (ou 2^{ème} loi de Newton), déterminer ce que serait le vecteur accélération s'il n'y avait aucun frottement entre le mobile et la table. Comparer à la valeur obtenue précédemment et en déduire, qu'il y a bien eu frottement.

Si \vec{R} est la force exercée par l'ensemble {plan P + coussin d'air} sur le solide S en translation à la vitesse v . Cette force \vec{R} peut se décomposer en deux vecteurs \vec{f} et \vec{R}_N ($\vec{R} = \vec{f} + \vec{R}_N$) avec \vec{f} composante tangentielle de \vec{R} et \vec{R}_N composante normale.



On appelle coefficient de frottement dynamique du solide S sur le plan P le nombre $k = \frac{f}{R_N}$.

En utilisant le résultat du 1. b. et par application du théorème du centre d'inertie (ou 2^{ème} loi de Newton), calculer la valeur de k . Le comparer aux quelques valeurs de k données ci-dessous :

acier sur acier : $k = 0,1$; téflon sur acier : $k = 0,04$; métal sur glace : $k = 0,02$.

Données : $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, $\sin \alpha = 3,41 \cdot 10^{-2}$.

Exercice 12 Démarrage d'une automobile

On étudie le démarrage d'une automobile de masse M qui se déplace sur une route horizontale et rectiligne ; étant à l'arrêt, le conducteur démarre et le centre d'inertie atteint la vitesse de valeur v_f au bout d'une distance d .

Données : $M = 1\,250 \text{ kg}$; $v_f = 100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$; $d = 500 \text{ m}$.

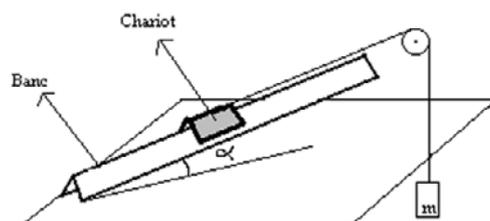
- 1 Déterminer l'équation horaire liant l'abscisse x du centre d'inertie de l'automobile au temps t en considérant l'accélération du centre d'inertie constante (on calculera l'accélération).
- 2 Déterminer les caractéristiques du vecteur représentant la somme vectorielle des forces appliquées à l'automobile.

Exercice 13 Chariot sur un plan incliné

On étudie le mouvement d'un chariot de masse M sur un banc à coussin d'air incliné d'un angle α par rapport à l'horizontale (voir schéma) ; un fil inextensible de masse négligeable relie le chariot à un objet de masse m par l'intermédiaire d'une poulie de masse négligeable.

Dans tout l'exercice, on négligera les forces de frottement exercées sur le chariot ainsi que les frottements liés à la rotation de la poulie.

Données : $M = 380 \text{ g}$; $m = 250 \text{ g}$; $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.



Les positions du chariot sont enregistrées et données par rapport à une origine O d'abscisse $x = 0$; à $t = 0$, le chariot est immobile puis se déplace vers le haut ; les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

t (ms)	0	60	120	180	240	300	360	420
x (mm)	0	3	11	23	42	65	94	127

- a) Déterminer la vitesse instantanée du centre d'inertie du chariot pour toutes les positions où il est possible de la déterminer avec une bonne approximation (on justifiera la méthode employée).
- b) En utilisant une méthode graphique et les résultats du 1. a., montrer que le mouvement est uniformément varié et déterminer la valeur de l'accélération du centre d'inertie du chariot.

- c) Tous les points du chariot ont-ils la même accélération ?
- ② On étudie le système constitué par l'objet de masse m .
- a) Faire le bilan des forces exercées sur l'objet de masse m (on représentera ces forces sur un schéma).
- b) Déterminer la valeur de la force exercée par le fil sur l'objet de masse m .
- ③ On étudie le système constitué par le chariot.
- a) Faire le bilan des forces exercées sur le chariot (on représentera ces forces sur un schéma).
- b) Déterminer la valeur de l'angle α d'inclinaison du banc par rapport à l'horizontale.

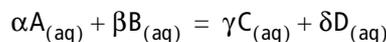
Chimie

Objectifs

- ▶ En disposant de l'équation d'une réaction, donner l'expression littérale du quotient de réaction, Q_r , et calculer sa valeur dans un état donné du système.
- ▶ Savoir qu'un système évolue spontanément vers un état d'équilibre.
- ▶ Être capable de déterminer le sens d'évolution d'un système donné en comparant la valeur du quotient de réaction dans l'état initial à la constante d'équilibre, dans le cas de réactions acido-basiques et d'oxydoréduction.

Quotient de réaction Q_r et constante d'équilibre K

Considérons un système chimique subissant une transformation associée à la réaction d'équation générale :



Dans un état donné du système (pression P , température T , concentrations molaires des espèces dissoutes), le quotient de réaction noté Q_r , est défini par :

$$Q_r = \frac{[C]^\gamma \cdot [D]^\delta}{[A]^\alpha \cdot [B]^\beta}$$

Ainsi, si le système est à l'état initial (avant toute transformation), les concentrations des espèces dissoutes A , B , C et D sont les concentrations initiales et notées $[A]_i$, $[B]_i$, $[C]_i$, $[D]_i$.

L'expression du quotient de réaction devient :

$$Q_r = \frac{[C]_i^\gamma \cdot [D]_i^\delta}{[A]_i^\alpha \cdot [B]_i^\beta}$$

Remarques

- Il est nécessaire de connaître l'état physique des différentes espèces chimiques du système, car dans l'expression de Q_r , n'interviennent que les concentrations molaires des espèces dissoutes (ions, molécules, gaz); par conséquent, toute espèce chimique à l'état solide n'est pas à prendre en compte.*
- De même, la concentration molaire du solvant (l'eau) n'est pas à prendre en compte.*
- Le quotient de réaction est une grandeur sans dimension (sans unité).*

Le quotient de réaction, dans l'état d'équilibre d'un système, $Q_{r,eq}$, prend une valeur indépendante de la composition initiale de ce système. Cette constante est appelée constante d'équilibre K associée à l'équation de réaction, à une température donnée.

A Exemple de réaction acido-basique

Le système étudié est constitué d'acide éthanóique, d'ion éthanóate, d'acide méthanoíque et d'ions méthanoate.

Les couples acide-base sont : $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{CH}_3\text{COO}^-$ et $\text{HCOOH}/\text{HCOO}^-$ de $\text{p}K_A$ respectifs : 4,8 et 3,8.

On mélange $2,0 \cdot 10^{-3}$ mol d'acide éthanóique, $1,0 \cdot 10^{-3}$ mol d'ions éthanóate, $5,0 \cdot 10^{-3}$ mol d'acide méthanoíque et $1,0 \cdot 10^{-2}$ mol d'ions méthanoate dans une quantité d'eau telle que l'on obtient 1 L de solution.

Activité 1

- Calculer la concentration molaire de chaque espèce chimique à l'état initial.
- Écrire l'équation de la réaction équilibrée entre l'acide méthanoíque et les ions éthanóate.
- Écrire l'expression littérale du quotient de réaction Q_r .

Il est alors possible de calculer la valeur du quotient de réaction Q_r pour différents états du système :

► à l'état initial du système :

Les concentrations initiales des différentes espèces chimiques sont les concentrations introduites, donc :

$$Q_r = \frac{[\text{CH}_3\text{COOH}]_i \cdot [\text{HCOO}^-]_i}{[\text{HCOOH}]_i \cdot [\text{CH}_3\text{COO}^-]_i} = \frac{2,0 \cdot 10^{-3} \times 1,0 \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 10^{-3} \times 1,0 \cdot 10^{-3}} = 4$$

► à l'équilibre, c'est-à-dire lorsque la transformation que subit le système est achevée :

La mesure du pH du système donne : $\text{pH} = 4,2$.

Activité 2

- Pour chaque couple acide-base, calculer la valeur du rapport : $\frac{[\text{base}]_{\text{eq}}}{[\text{acide}]_{\text{eq}}}$ à partir de la relation :

$$\text{pH} = \text{p}K_A + \log\left(\frac{[\text{base}]_{\text{eq}}}{[\text{acide}]_{\text{eq}}}\right).$$

- Calculer la valeur du quotient de réaction, à l'équilibre. À quoi est-il égal ?
- Pour chaque couple acide-base, comparer les valeurs de $\frac{[\text{base}]_i}{[\text{acide}]_i}$ et $\frac{[\text{base}]_{\text{eq}}}{[\text{acide}]_{\text{eq}}}$.
- En déduire le sens d'évolution du système (sens **direct** c'est-à-dire de la gauche vers la droite de l'équation de réaction ou bien sens **inverse**).
- Comparer la valeur du quotient de réaction Q_r , à l'état initial, puis à l'état final.

Nous pouvons généraliser ces résultats et dire que :

La seule valeur de la constante d'équilibre K ne permet pas de prévoir le sens d'évolution d'un système. On utilise comme critère, la comparaison du quotient de réaction avec la constante d'équilibre (à l'exclusion de toute considération cinétique).

Tout système qui évolue vers un état d'équilibre voit donc son quotient de réaction évoluer vers la valeur de sa constante d'équilibre K .

Si $Q_r < K$, alors le sens spontané de transformation est le sens direct.

Voyons alors le cas où : $Q_r > K$:

On réalise le même mélange que précédemment : $2,0 \cdot 10^{-3}$ mol d'acide éthanóique, $1,0 \cdot 10^{-3}$ mol d'ions éthanóate, $5,0 \cdot 10^{-3}$ mol d'acide méthanoíque et $1,0 \cdot 10^{-2}$ mol d'ions méthanoate dans une quantité d'eau telle que l'on obtient 1 L de solution.

- Activité 3**
- Écrire l'équation de la réaction équilibrée entre l'acide éthanóique et les ions méthanoate.
 - Écrire l'expression littérale du quotient de réaction Q'_r .

Comme précédemment, il est alors possible de calculer la valeur du quotient de réaction Q'_r pour différents états du système :

► à l'état initial du système :

Les concentrations initiales des différentes espèces chimiques sont les concentrations introduites, donc :

$$Q'_r = \frac{[\text{HCOOH}]_i \cdot [\text{CH}_3\text{COO}^-]_i}{[\text{CH}_3\text{COOH}]_i \cdot [\text{HCOO}^-]_i} = \frac{5,0 \cdot 10^{-3} \times 1,0 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3} \times 1,0 \cdot 10^{-2}} = \frac{1}{Q_r} = \frac{1}{4} = 0,25$$

► à l'équilibre, c'est-à-dire lorsque la transformation que subit le système est achevée :

Évidemment, la mesure du pH du système donne encore : $\text{pH} = 4,2$.

Activité 4

- Pour chaque couple acide-base, calculer la valeur du rapport : $\frac{[\text{base}]_{\text{eq}}}{[\text{acide}]_{\text{eq}}}$.
- Calculer la valeur du quotient de réaction, à l'équilibre.
- Pour chaque couple acide-base, comparer les valeurs de $\frac{[\text{base}]_i}{[\text{acide}]_i}$ et $\frac{[\text{base}]_{\text{eq}}}{[\text{acide}]_{\text{eq}}}$.
- En déduire le sens d'évolution du système.
- Comparer la valeur du quotient de réaction Q'_r , à l'état initial, puis à l'état final.
- Donner une conclusion sur l'évolution du système en fonction de l'évolution de la valeur de Q'_r .

On déduit de ce qui précède que : si $Q_r = K$, le système n'évolue pas macroscopiquement ; l'état d'équilibre du système est atteint.

B Exemples de réaction d'oxydoréduction

► Le système étudié est constitué d'ions fer (II), d'ions fer (III), d'ions iodure et de diode.

Les couples oxydoréducteurs sont : $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ et I_2/I^- .

On mélange des solutions d'ions fer (II), d'ions fer (III), d'ions iodure et de diode, chacune de ces substances étant en concentration initiale égale à $1,0 \cdot 10^{-2}$ mol · L⁻¹.

Activité 5

- Écrire l'équation de la réaction entre l'ion fer (III) et l'ion iodure.
- Écrire l'expression littérale du quotient de réaction Q_r et calculer sa valeur à l'état initial du système.
- La valeur de la constante K de cet équilibre est : $10^{7,7}$. En déduire le sens spontané de la transformation subie par le système.

► Considérons maintenant un système constitué d'ions fer (II), d'ions cuivre (II), de poudre de fer et de poudre de cuivre.

Les couples oxydoréducteurs sont : Fe^{2+}/Fe et Cu^{2+}/Cu .

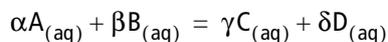
On mélange des solutions d'ions fer (II) et d'ions cuivre (II) en présence de poudre de fer et de poudre de cuivre ; la concentration initiale en fer (II) est de $1,0 \cdot 10^{-2}$ mol · L⁻¹, celle des ions cuivre de $5 \cdot 10^{-2}$ mol · L⁻¹.

Activité 6

- Écrire l'équation de la réaction entre l'ion fer (II) et le cuivre métal (de constante d'équilibre $K = 10^{-26}$).
- En procédant comme lors de l'Activité 5, trouver le sens d'évolution spontané du système.

Résumé

Considérons un système chimique subissant une transformation associée à la réaction d'équation générale :



Dans un état donné du système (pression P, température T, concentrations molaires des espèces dissoutes), le quotient de réaction noté Q_r , est défini par :

$$Q_r = \frac{[C]^\gamma \cdot [D]^\delta}{[A]^\alpha \cdot [B]^\beta}$$

Le quotient de réaction, dans l'état d'équilibre d'un système, $Q_{r, eq}$, prend une valeur indépendante de la composition initiale de ce système. Cette constante est appelée constante d'équilibre K associée à l'équation de réaction, à une température donnée.

La seule valeur de la constante d'équilibre K ne permet pas de prévoir le sens d'évolution d'un système. On utilise comme critère la comparaison du quotient de réaction avec la constante d'équilibre (à l'exclusion de toute considération cinétique).

Tout système qui évolue vers un état d'équilibre voit donc son quotient de réaction évoluer vers la valeur de sa constante d'équilibre K.

Si $Q_r < K$, alors le sens spontané de transformation est le sens direct.

Si $Q_r > K$, alors le sens spontané de transformation est le sens inverse.

Si $Q_r = K$, le système n'évolue pas macroscopiquement ; l'état d'équilibre du système est atteint.

Exercices

Exercice ❶ Réaction acido-basique

On met en présence 10 mL d'acide nitrique ($\text{H}_3\text{O}^+ + \text{NO}_3^-$) de concentration $2 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et 20 mL d'hydroxyde de sodium ($\text{Na}^+ + \text{OH}^-$) à $5 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

- ❶ Quelle est la concentration initiale, des ions hydronium d'une part, et des ions hydroxyde d'autre part, dans le mélange ?
- ❷ Écrire l'équation de la réaction associée à la transformation subie par le système.
- ❸ Calculer la valeur du quotient de réaction Q_r , à l'état initial.
- ❹ Calculer la constante d'équilibre associée à la réaction.
- ❺ Prévoir le sens d'évolution spontané du système.
- ❻ Calculer le pH de la solution, à l'état final.

Données : $\text{p}K_A : \text{H}_3\text{O}^+/\text{H}_2\text{O} : 0,0 ; \text{H}_2\text{O}/\text{OH}^- : 14,0$.

Exercice ❷ Réaction acido-basique (bis)

On met en présence 10 mL d'acide sulfurique ($2\text{H}_3\text{O}^+ + \text{SO}_4^{2-}$) de concentration $2 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et 20 mL d'hydroxyde de sodium ($\text{Na}^+ + \text{OH}^-$) à $5 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

- ❶ Quelle est la concentration, des ions hydronium d'une part, et des ions hydroxyde d'autre part, dans le mélange ?
- ❷ Écrire l'équation de la réaction associée à la transformation subie par le système.
- ❸ Calculer la valeur du quotient de réaction Q_r , à l'état initial.
- ❹ Calculer la constante d'équilibre associée à la réaction.
- ❺ Prévoir le sens d'évolution spontané du système.
- ❻ Calculer le pH de la solution, à l'état final.

Données : $\text{p}K_A : \text{H}_3\text{O}^+/\text{H}_2\text{O} : 0,0 ; \text{H}_2\text{O}/\text{OH}^- : 14,0$.

Exercice ❸ Réaction d'oxydoréduction

Soit une lame de cuivre plongeant dans un mélange de solutions d'ions zinc Zn^{2+} à $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et d'ions cuivre (II) à $5 \cdot 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

- ❶ Écrire l'équation de la réaction subie par le système.
- ❷ Préciser si cette réaction est possible en calculant la valeur du quotient de réaction Q_r à l'état initial.

Données : couples Zn^{2+}/Zn et Cu^{2+}/Cu . $K = 10^{-37,3}$.

On plonge maintenant une lame de zinc dans un mélange de solutions d'ions cuivre (II) à $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et d'ions zinc (II) à $5 \cdot 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

- ❸ Écrire l'équation de la réaction subie par le système.
- ❹ Quelle est la valeur de la constante K' de cet équilibre ?
- ❺ Préciser si cette réaction est possible en calculant la valeur du quotient de réaction Q_i à l'état initial.

Exercice 4 Manganimétrie

① Écrire l'équation-bilan de la réaction d'oxydoréduction entre l'ion permanganate et l'ion fer (II) Fe^{2+} . (Couples $\text{MnO}_4^-/\text{Mn}^{2+}$ et $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$). On doit ajouter de l'acide sulfurique au milieu réactionnel. Expliquer.

② On utilise du sel de Mohr solide de formule $\text{FeSO}_4 \cdot (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

Calculer la masse à dissoudre dans 500 mL d'eau pour obtenir une solution de concentration $C = 0,2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Quelle est la concentration massique en ions fer (II) de cette solution ?

③ On utilise 10,0 mL de la solution de sel de Mohr pour vérifier la concentration d'une solution de permanganate préparée par des élèves à environ $0,02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

On obtient $V_{\text{eq}} = 20,6 \text{ mL}$, en déduire la concentration de la solution de permanganate de potassium en $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et en $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.

④ Calculer la valeur du quotient de réaction Q_i à l'état initial suivant : $0,2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ en ions fer (II), $0,02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ en permanganate, $0,2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ en ions fer (III), $0,02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ en ions Mn^{2+} et $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ en ions H_3O^+ . La valeur de la constante d'équilibre K est de 10^{62} . Conclusion ?

Données : masses molaires en $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$

Fe : 55,85 ; S : 32,06 ; O : 16,00 ; N : 14,01 ; H : 1,01 ; Mn : 54,94 ; O : 16,00 ; K : 39,10. ■

Séquence



> **Physique :**

**Applications de la
deuxième loi de Newton**

> **Chimie :**

Piles et électrolyses

Physique > Applications de la deuxième loi de Newton

Chapitre 1	>	Chute verticale d'un solide	233
		A Forces exercées sur un solide dans un fluide	
		B Chute verticale avec frottement	
		C Chute verticale libre	
Chapitre 2	>	Cas des mouvements plan	239
		A Projectile dans un champ de pesanteur uniforme	
		B Satellites et planètes	
Résumé	>	.....	247
Exercices	>	.....	248

Chimie > Piles et électrolyses

Chapitre 1	>	Transferts spontanés d'électrons entre espèces chimiques	257
Chapitre 2	>	Utilisation du transfert spontané d'électrons : les piles	258
		A Constitution	
		B fonctionnement	
		C Évolution spontanée du système	
Chapitre 3	>	Transformation forcée : l'électrolyse	261
		A Mise en évidence expérimentale	
		B Applications	
Chapitre 4	>	Comparaison des caractéristiques de quelques piles	264
Résumé	>	.....	265
Exercices	>	.....	267

Physique

Objectifs

- ▶ Connaître la Poussée d'Archimède.
- ▶ Savoir appliquer la deuxième loi de Newton à un corps en chute verticale dans un fluide.
- ▶ Connaître le principe de la méthode d'Euler pour la résolution approchée d'une équation différentielle.
- ▶ Savoir appliquer la deuxième loi de Newton au centre d'inertie d'un projectile.
- ▶ Savoir appliquer la deuxième loi de Newton au centre d'inertie d'un satellite ou d'une planète.

Nous allons étudier dans cette partie la chute verticale avec frottement ou sans frottement (c'est-à-dire libre).

Activité 1 Prenez une feuille de papier A4 dans la main droite et un livre de même format dans la main gauche ; lâchez-les à plat d'une hauteur de 1 mètre environ sans vitesse initiale.

a) Les mouvements de ces deux corps sont-ils identiques ?

Posez la feuille de papier A4 sur le livre et laissez-les tomber à plat d'une hauteur de 1 mètre.

b) Les mouvements de ces deux corps sont-ils identiques ?

c) Justifier les différences observées entre les deux expériences effectuées.

A

Forces exercées sur un solide qui chute dans un fluide

Force exercée par la Terre : le poids

En seconde, vous avez vu que la force de pesanteur était un cas particulier de la force de gravitation (les effets dus aux mouvements de la Terre sont négligeables).

La force de pesanteur a pour expression : $\vec{P} = m\vec{g}$; \vec{g} est appelé champ de pesanteur.

Dans toute cette partie, on étudie des solides en interaction avec la Terre à proximité de la Terre ; le champ de pesanteur \vec{g} est supposé constant (même direction, même sens et même valeur).

On dit que le **champ de pesanteur est uniforme**.

Forces exercées par le fluide

La poussée d'Archimède

Considérons les actions réparties exercées par de l'eau sur un ballon partiellement immergé ; ces actions sont modélisées par une force appliquée au centre de symétrie I du fluide déplacé ; cette force \vec{P}_A est appelée poussée d'Archimède ; sa direction est la verticale, son sens est vers le haut, sa valeur (ou intensité) est égale au poids du volume d'eau déplacée ($\rho_0 V g$) où V est le volume d'eau déplacée de masse volumique ρ_0 .

Forces de frottement exercées par le fluide sur le solide en mouvement

Ces forces de frottement s'opposent au mouvement ; nous considérerons deux cas :

– si la vitesse du solide est faible, la force est du type : $\vec{f} = -h\vec{v}$,

– si la vitesse du solide est relativement grande, la force est du type : $\vec{f} = -hv\vec{v}$.

B

Chute verticale avec frottement

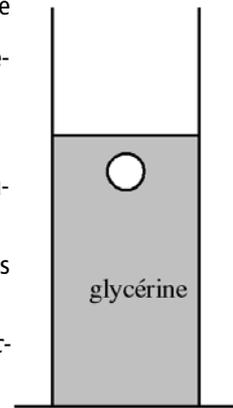
Dans cette partie, on étudie le mouvement de chute verticale d'une bille dans un liquide visqueux ; la bille d'acier de rayon r et de masse m est en mouvement de translation dans de la glycérine de viscosité η . Le référentiel du laboratoire est considéré comme galiléen.

On admettra que les actions de frottement exercées par le liquide sur la bille en mouvement sont modélisables par une force $\vec{f} = -6\pi\eta r\vec{v}_G$ où \vec{v}_G représente le vecteur vitesse du centre d'inertie de la bille ;

nous poserons : $h = 6\pi\eta r$.

Données : masse volumique de l'acier : $\rho = 7\,800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; masse volumique de la glycérine : $\rho_0 = 1\,260 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

On dépose la bille en O sans vitesse initiale dans la glycérine contenue dans une grande éprouvette.



Activité 2

Faire l'inventaire des forces extérieures agissant sur la bille. Donner les caractéristiques de ces forces et représenter-les sur un schéma.

Recopier le bilan du corrigé dans le cadre ci-dessous.

Dans le référentiel galiléen considéré, appliquons la deuxième loi de Newton au centre d'inertie de la bille :

$$m\vec{a}_G = \sum \vec{F}_{\text{ext}} \quad \text{avec} \quad \sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{P} + \vec{P}_A + \vec{f} \Rightarrow m\vec{a}_G = \vec{P} + \vec{P}_A + \vec{f}.$$

L'équation différentielle du mouvement du centre d'inertie de la bille s'écrit donc :

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{P} + \vec{P}_A + \vec{f}$$

On projette cette relation vectorielle sur la verticale orientée vers le bas :

$$m \frac{dv}{dt} = mg - \rho_0 Vg - hv \Rightarrow m \frac{dv}{dt} + hv = (m - \rho_0 V)g \quad \text{avec } V \text{ volume de la bille.}$$

ce qui peut s'écrire : $\frac{dv}{dt} + \frac{h}{m}v = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right)g$ (1) (puisque : $m = \rho V$).

On peut résoudre l'équation différentielle (1) par deux types de méthode :

- une méthode numérique, appelée méthode d'Euler,
- une méthode analytique déjà utilisée pour résoudre les équations différentielles liées à la charge d'un condensateur ou à l'établissement du courant dans un circuit.

■ Résolution numérique de l'équation différentielle (1) : méthode d'Euler.

Cette méthode est utilisable si l'on connaît la vitesse initiale v_0 et l'accélération initiale a_0 à l'instant de date t_0 .

Intéressons nous à la vitesse de la bille à l'instant de date t_1 tel que $t_1 = t_0 + \Delta t$ avec Δt très faible (5 ms par exemple).

La méthode d'Euler permet de déterminer la vitesse v_1 à l'instant de date t_1 de la bille connaissant v_0 et a_0 en utilisant une approximation liée à Δt très faible.

Par définition : $a = \frac{dv}{dt} \Rightarrow$ lorsque Δt tend vers zéro, c'est-à-dire lorsque Δt est très faible, nous pouvons faire l'approximation suivante : $a \approx \frac{\Delta v}{\Delta t} \Rightarrow \Delta v = a\Delta t$.

On suppose que l'accélération reste constante et égale à a_0 sur Δt ($t_1 - t_0 = \Delta t$) $\Rightarrow v_1 - v_0 = a_0\Delta t \Rightarrow v_1 = v_0 + a_0\Delta t$.

Pour trouver v_2 , on utilise la même méthode en considérant que l'accélération reste constante et égale à a_1 sur le deuxième intervalle de temps Δt ($t_2 - t_1 = \Delta t$) $\Rightarrow v_2 - v_1 = a_1\Delta t \Rightarrow v_2 = v_1 + a_1\Delta t$.

Comment trouver a_0 ?

$$a = \frac{dv}{dt} = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right)g - \frac{h}{m}v \text{ d'après l'équation différentielle ;}$$

$$\text{à } t_0, v = v_0, \text{ d'où } a_0 = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right)g - \frac{h}{m}v_0.$$

Comment trouver a_1 connaissant a_0 ?

Dérivons l'accélération a : $\frac{da}{dt} = -\frac{h}{m}\frac{dv}{dt}$; comme Δt est très faible :

$$\frac{\Delta a}{\Delta t} \approx -\frac{h}{m}a \Rightarrow a_1 = a_0 - \frac{h}{m}a_0\Delta t = \left(1 - \frac{h}{m}\Delta t\right)a_0.$$

$$\text{De même : } v_3 = v_2 + a_2\Delta t \text{ avec } a_2 = \left(1 - \frac{h}{m}\Delta t\right)a_1.$$

Activité 3

Remplir le tableau suivant en utilisant la méthode d'Euler et tracer la courbe donnant la vitesse en fonction du temps.

On pourra utiliser le tableur Excel par exemple, ...

Données : $h = 0,0234 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$; $m = 0,26 \text{ g}$; $\Delta t = 5 \text{ ms}$; masse volumique de l'acier : $\rho = 7800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; masse volumique de la glycérine : $\rho_0 = 1260 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Temps (s)	Vitesse ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Accélération ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
0	0	$a_0 = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right)g = 8,23$
0,005	$v_1 = 0,041$	$a_1 =$
0,010		
0,015		
0,020		
0,025		
0,030		
0,035		
0,040		
0,045		
0,050		
0,055		
0,060		

Il faut que le pas c'est-à-dire Δt soit suffisamment faible pour que la méthode d'Euler soit acceptable.

➡ Résolution analytique de l'équation différentielle (1) : $\frac{dv}{dt} + \frac{h}{m}v = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right)g$.

Nous admettons que la solution de cette équation différentielle s'écrit : $v(t) = Ae^{-\frac{h}{m}t} + B$.

Le terme $\frac{m}{h}$ a la dimension d'un temps ; nous retrouvons : $\tau = \frac{m}{h}$ que nous appellerons par la suite temps caractéristique du mouvement.

Lorsque t tend vers l'infini, la vitesse $v(t)$ est constante et égale à la vitesse limite v_{lim} : $B = v_{\text{lim}}$;

la solution s'écrit donc : $v(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}} + v_{\text{lim}}$.

La constante A est déterminée par les conditions initiales : à $t = 0$, $v(0) = 0$ d'où :
 $v(0) = v_{\text{lim}} + A = 0 \Rightarrow A = -v_{\text{lim}}$.

On en déduit : $v(t) = v_{\text{lim}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$.

La solution de l'équation différentielle précédente est de la forme :

$$v = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho} \right) \frac{mg}{h} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

lorsque t devient très grand la vitesse de la bille tend vers une vitesse limite : $v_{\text{lim}} = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho} \right) \frac{mg}{h}$

ce qui nous donne en fonction des données : $v_{\text{lim}} = \frac{2(\rho - \rho_0)g}{9\eta} r^2$.

Le temps caractéristique du mouvement est : $\tau = \frac{m}{h} = \frac{m}{6\pi\eta r} = \frac{2\rho r^2}{9\eta}$ (puisque $m = \frac{4}{3}\pi\rho r^3$).

Activité 4

- 1 Si une bille de même rayon r chute dans un liquide plus visqueux, la vitesse limite sera-t-elle plus importante ? La durée nécessaire pour atteindre cette vitesse limite sera-t-elle modifiée ?
- 2 Si une bille de plus grand rayon chute dans un liquide de même viscosité ; la vitesse limite sera-t-elle plus importante ? La durée nécessaire pour atteindre cette vitesse limite sera-t-elle modifiée ?

En utilisant la solution $v = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho} \right) \frac{mg}{h} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$,

on obtient la courbe suivante donnant la vitesse en fonction du temps t :

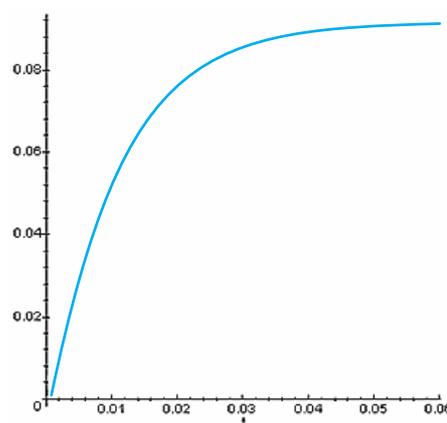
Données : masse volumique de l'acier :

$$\rho = 7\,800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} ;$$

masse volumique de la glycérine :

$$\rho_0 = 1\,260 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} ;$$

$$g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} ; r = 2 \text{ mm} ; \eta = 0,62 \text{ SI} .$$



Activité 5

On étudie la courbe précédente représentant $v = f(t)$.

- 1 Comparer les valeurs obtenues par la solution analytique et celles obtenues par la solution numérique (on pourra utiliser le tableur Excel par exemple, ...).
- 2 Commenter l'évolution de la vitesse en fonction du temps t. Noter sur la courbe le régime initial et le régime asymptotique (dit « permanent »).
- 3 Déterminer le temps caractéristique τ par la méthode de la tangente à l'origine. Comparer cette valeur à la valeur théorique.
- 4 Au bout d'une durée supérieure à 5τ , que peut-on dire du mouvement de la bille ? À quoi est égale la somme vectorielle des forces extérieures appliquées sur la bille ?

Vous noterez la réponse du corrigé dans le cadre ci-dessous.

C Chute verticale libre

Activité 6 Sur le document ci-contre, on a reproduit la chronophotographie (intervalle de temps $\tau = 0,05 \text{ s}$) du mouvement de chute libre d'une balle de masse 35 g . À l'altitude z_1 , la balle est immobile.

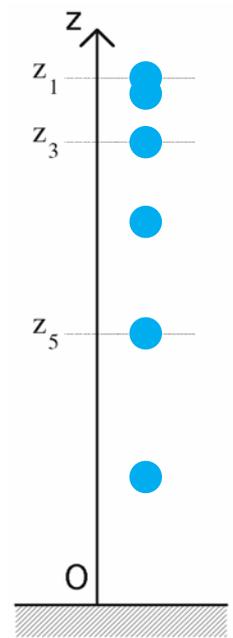
Dans le tableau suivant on donne pour les différentes positions de la balle son altitude et la vitesse du centre d'inertie de la balle v_G .

	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5	Position 6
Altitude z (cm)	40,4	39,2	35,5	29,4	20,8	9,8
Vitesse v_G ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0	0,49	0,98	1,47	1,96	2,45

Vous devez déterminer l'accélération de la balle lorsqu'elle est en position 2 puis en position 5.

Que remarque-t-on ?

Donnée : $g = 9,8 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$.



Étudions le mouvement de chute libre d'une balle de masse m dans le référentiel terrestre considéré comme galiléen ; lorsque la balle est lâchée sans vitesse initiale.

Recherchons l'équation différentielle du mouvement du centre d'inertie.

- Système : la balle.
- Référentiel : référentiel terrestre considéré comme galiléen.
- Bilan des forces extérieures exercées sur la balle ; il n'y en a qu'une : le poids de la balle \vec{P} .
- Dans le référentiel galiléen choisi, appliquons la 2^{ème} loi de Newton au centre d'inertie G de la balle :

$$m\vec{a}_G = \sum \vec{F}_{\text{ext}} \quad \text{avec} \quad \sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{P} \Rightarrow m\vec{a}_G = m\vec{g} \Rightarrow \vec{a}_G = \vec{g}$$

Le vecteur accélération \vec{a}_G est égal à \vec{g} . Le vecteur accélération a une direction verticale, un sens vers le bas et une valeur égale à g .

Remarque :

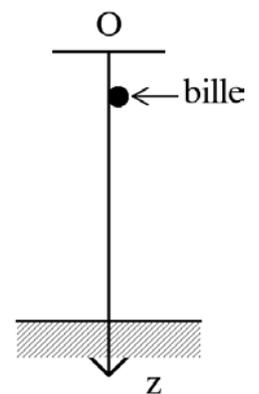
dans la relation $m\vec{a}_G = m\vec{g}$ la masse qui intervient dans le terme $m\vec{a}_G$ de la deuxième loi de Newton est la masse inertielle m_i ; la masse qui intervient dans le terme $m\vec{g}$ de la force de pesanteur est la masse gravitationnelle m_g . La chute libre permet donc de vérifier l'identité des deux masses. C'est cette identité qui nous permet d'affirmer que l'accélération de tous les corps en chute libre est égale à g .

À la date $t = 0$, nous prendrons comme conditions initiales : $z_0 = 0$ et la vitesse du centre d'inertie nulle : $v_0 = 0$.

L'accélération \vec{a}_G du centre d'inertie est constante ; par définition $\vec{a}_G = \frac{d\vec{v}_G}{dt} \Rightarrow \frac{d\vec{v}_G}{dt} = \vec{g}$.

►► Résolution analytique de l'équation différentielle (2).

$$\frac{dv_G}{dt} = g \quad (\text{axe Oz orienté vers le bas}) \Rightarrow dv_G = a_G dt$$



On intègre cette expression : $v_G = a_G t + v_0$ soit : $v_G = gt$ (1) puisque $v_0 = 0$.

Par définition : $v_G = \frac{dz}{dt}$, ce qui nous donne : $dz = v_G dt = gdt$

soit : $z = \frac{1}{2} gt^2 + z_0$ avec $z_0 = 0$.

L'équation horaire liant l'altitude z du centre d'inertie de la bille au temps t s'écrit : $z = \frac{1}{2} gt^2$ (2).

Les relations (1) et (2) permettent d'éliminer t ; on obtient une relation entre g , v_G et z : $v_G^2 = 2gz$.

Le mouvement du centre d'inertie est donc **rectiligne uniformément varié (l'accélération est constante)**.

Le mouvement de la bille est indépendant de sa masse.

Activité 7 Reprendre le tableau de l'activité 6.

❶ Tracer v_G en fonction de t (l'intervalle de temps est égal à $\tau = 0,05$ s). Commenter la courbe obtenue. Pourquoi peut-on dire en regardant la courbe que le mouvement du centre d'inertie est uniformément varié.

❷ Établir l'équation horaire existant entre l'altitude z et le temps t ; vérifier la relation obtenue en comparant vos valeurs à celles du tableau.

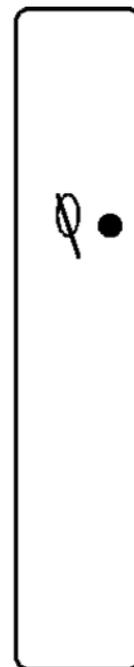
Vérification expérimentale

Si on lâche une bille et une plume dans un tube où l'on a fait le vide (expérience du tube de Newton); la plume et la bille ont le même mouvement; la trajectoire est verticale.

En chute libre, c'est-à-dire lorsque les corps ne sont soumis qu'à leur poids, le mouvement de ces corps est indépendant de leur masse.

Activité 8 On étudie la chute d'une boule de pétanque dans l'air; les frottements sont négligeables et le champ de pesanteur est uniforme. À différentes hauteurs H de chute, on a mesuré la vitesse v atteinte par la boule.

H (m)	v (m · s ⁻¹)
0	0
0,5	
1	4,43
2	6,26
3	7,67
4	8,85
5	9,90



Tube de Newton

En utilisant votre calculatrice et une feuille de papier millimétré (ou un tableur sur ordinateur), rechercher sans faire de calculs la relation existant entre v et H pour la chute de la boule; on recherchera une relation de proportionnalité entre v et H ou entre v et \sqrt{H} .

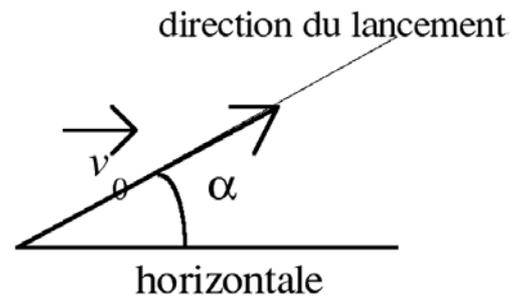
Déterminer théoriquement cette relation et calculer la valeur de la vitesse qui manque dans le tableau.

A Mouvements de projectiles dans un champ de pesanteur uniforme

Dans cette partie, nous nous intéressons au mouvement du centre d'inertie d'un projectile dans un champ de pesanteur uniforme dans le cas où les frottements peuvent être négligés.

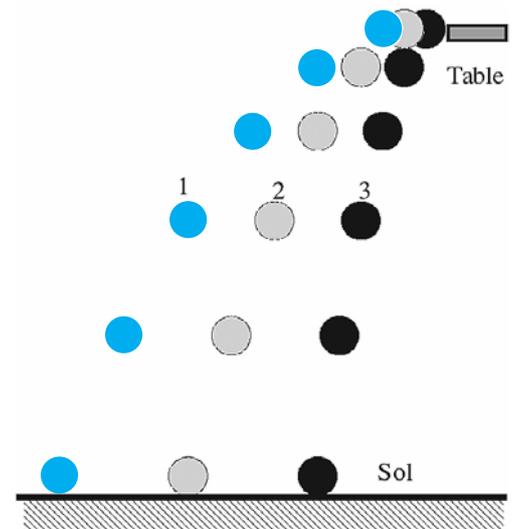
Vous aviez vu en seconde que le mouvement d'un projectile était modifié si l'on modifiait la direction du lancement ou la valeur de la vitesse initiale V_0 .

Les conditions initiales sont donc très importantes comme le montrent les exemples suivants.

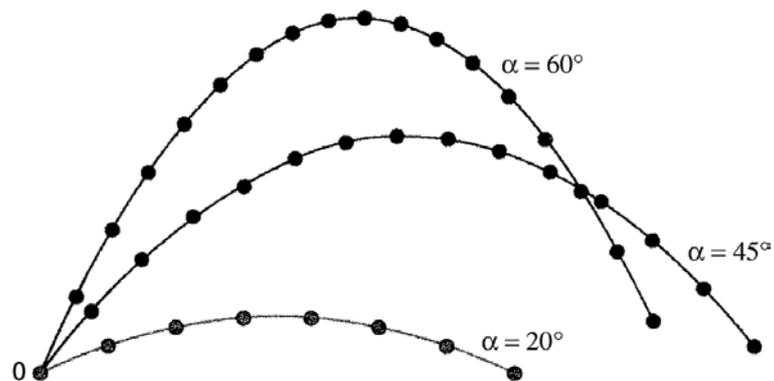


► Modifions la valeur de la vitesse initiale lorsque le projectile est lancé horizontalement ($\alpha = 0$).

Si on lance une balle avec trois vitesses initiales différentes ($V_1 > V_2 > V_3$), on obtient les chronophotographies suivantes :



► Modifions la direction du lancement tout en gardant la même valeur de la vitesse.



Recherchons quelle est l'équation de la trajectoire du centre d'inertie d'un projectile lancé du point O.

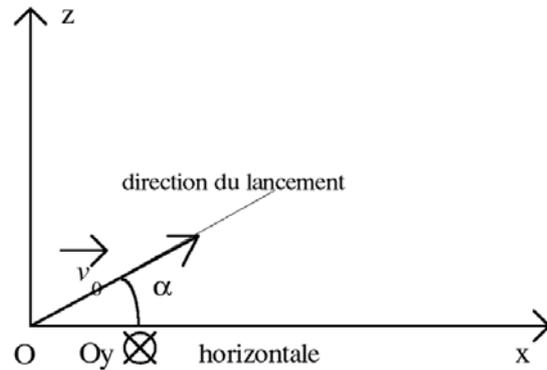
Les conditions initiales sont données par le schéma suivant :

$$x_0 = 0 ; y_0 = 0 ; z_0 = 0 ;$$

$$\vec{v}_0 = v_0(\cos \alpha \vec{i} + \sin \alpha \vec{k})$$

$$\vec{g} = -g\vec{k}$$

Dans le référentiel terrestre considéré comme galiléen, appliquons la deuxième loi de Newton au centre d'inertie du projectile : $m\vec{a}_G = \sum \vec{F}_{\text{ext}}$.



Le projectile n'est soumis qu'à la force de pesanteur : $\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{P} \Rightarrow m\vec{a}_G = \vec{P} = m\vec{g}$.

L'équation différentielle du mouvement du centre d'inertie du projectile s'écrit donc : $\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{g}$.

$$\Rightarrow \frac{dv_x}{dt} \vec{i} + \frac{dv_y}{dt} \vec{j} + \frac{dv_z}{dt} \vec{k} = -g\vec{k}$$

On projette cette relation vectorielle dans le repère (O, Ox, Oy, Oz), ce qui donne :

$$\frac{dv_x}{dt} = 0, \frac{dv_y}{dt} = 0, \frac{dv_z}{dt} = -g.$$

Intégrons ces relations :

$$\frac{dv_x}{dt} = 0 \Rightarrow v_x = v_0 \cos \alpha$$

$$\frac{dv_y}{dt} = 0 \Rightarrow v_y = 0$$

$$\frac{dv_z}{dt} = -g \Rightarrow v_z = -gt + v_0 \sin \alpha$$

Les équations horaires du mouvement sont obtenues après une deuxième intégration :

$$v_x = v_0 \cos \alpha \Rightarrow x = v_0 \cos \alpha t + x_0 = v_0 \cos \alpha t \quad (1)$$

$$v_y = 0 \Rightarrow y = y_0 \Rightarrow y = 0 \quad (2)$$

$$v_z = -gt + v_0 \sin \alpha \Rightarrow z = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0 \sin \alpha t + z_0 = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0 \sin \alpha t \quad (3)$$

Remarque

Le mouvement est plan puisque : $v_y = 0 \Rightarrow y = 0$.

On remplace t dans l'équation (3) par sa valeur obtenue dans l'équation (1) : $t = \frac{x}{v_0 \cos \alpha}$.

L'équation de la trajectoire s'écrit :

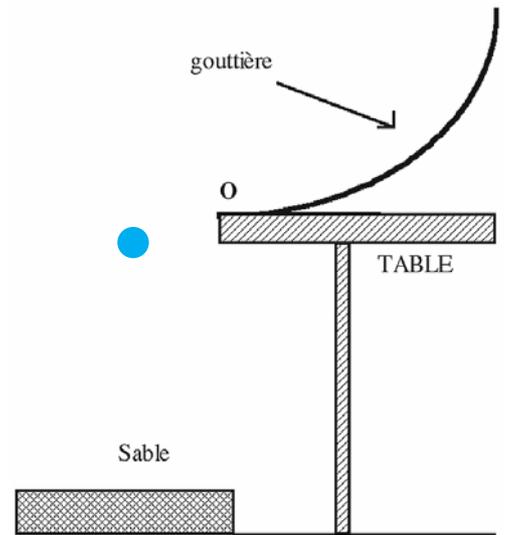
$$z = -\frac{1}{2} \frac{g}{(v_0 \cos \alpha)^2} x^2 + x \tan \alpha.$$

Activité 9

On étudie le mouvement d'une balle qui tombe d'une gouttière placée sur une table horizontale ; ce dispositif permet de faire varier la valeur de la vitesse de la balle lorsqu'elle quitte la table en O.

La chute libre de la balle avec vitesse initiale horizontale a été enregistrée à l'aide d'un appareil de chronophotographie à visée horizontale ; cet appareil a été placé face au montage ; il a permis d'obtenir une chronophotographie (intervalle de temps : $1/30^{\text{ème}}$ s).

À partir de la reproduction de cette chronophotographie (voir Schéma ci-dessous) marquer le centre de la balle pour chaque position et tracer les horizontales et verticales passant par ces points.



a) Indiquer sur l'axe horizontal Ox à quel niveau se trouve la balle pour chacune de ces positions.

Quelle est la nature du mouvement suivant l'axe Ox c'est-à-dire suivant l'horizontale ?

Justifier votre réponse en utilisant les équations horaires obtenues ci-dessus.

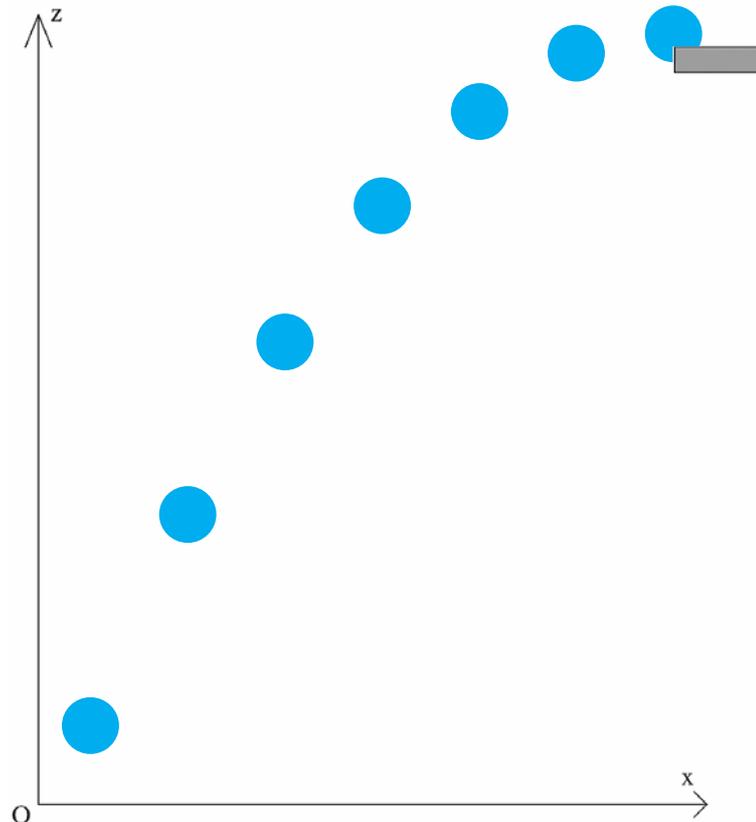
Comment pouvait-on justifier ce mouvement en classe de seconde ?

b) Indiquer sur l'axe vertical Oz à quel niveau se trouve la balle pour chacune de ces positions.

Quelle est la nature du mouvement suivant l'axe Oz, c'est-à-dire suivant la verticale ?

Justifier votre réponse en utilisant les équations horaires obtenues ci-dessus.

Comment pouvait-on justifier ce mouvement en classe de seconde ?



B Satellites et planètes

a) Référentiels géocentrique et héliocentrique

Pour étudier le mouvement d'une planète ou d'un satellite artificiel de la Terre, il n'est plus possible d'utiliser le référentiel terrestre.

Le mouvement des planètes peut être décrit en utilisant le référentiel de Copernic dont l'origine du repère est le centre d'inertie du système solaire et dont les axes sont dirigés vers des étoiles fixes.

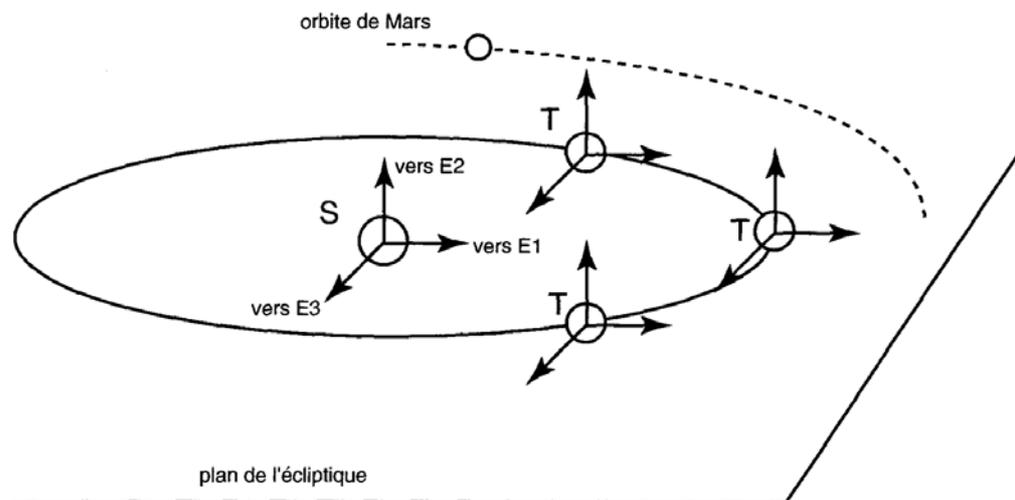
Nous utiliserons dans ce cours le **référentiel héliocentrique** dont l'origine du repère est le centre d'inertie du Soleil et dont les axes sont dirigés vers des étoiles fixes.

Le référentiel héliocentrique peut être considéré comme un référentiel galiléen même pour des mouvements de longue durée comme la révolution complète d'une planète autour du Soleil.

Le mouvement des satellites de la Terre (Lune ou satellite artificiel) est décrit en utilisant le **référentiel géocentrique**.

Tous les repères appartenant à ce référentiel ont leur origine au centre de la Terre et leurs axes parallèles à ceux d'un repère du référentiel de Copernic.

Le référentiel géocentrique ne peut être considéré comme galiléen que pour l'étude des satellites de la Terre.



Sur la figure ci-dessus, on a tracé un repère du référentiel héliocentrique dont l'origine est au centre du Soleil et dont les axes sont dirigés vers trois étoiles lointaines notées E1, E2, E3.

La Terre et un repère du référentiel géocentrique (origine au centre de la Terre et axes parallèles à ceux du référentiel héliocentrique) sont représentés en différents points de la trajectoire.

En conclusion, nous utiliserons comme référentiel d'étude considéré comme galiléen

- le référentiel héliocentrique pour l'étude du mouvement des planètes du système solaire,
- le référentiel géocentrique pour l'étude des satellites de la Terre.

b) La loi de gravitation universelle

En 1687, Newton publie la loi de la gravitation universelle qui s'applique aussi bien au mouvement de la Lune qu'à la chute d'une boule de pétanque.

Cette loi permet d'expliquer l'existence de la force exercée par la Terre sur la Lune.

Newton considère que deux corps, du simple fait de leurs masses, s'attirent mutuellement et instantanément.

Loi de la gravitation universelle

Dans le cas de deux corps A et B à répartition sphérique de masse m_A et m_B , la force d'interaction gravitationnelle exercée par A sur B a pour expression :

$$\vec{F}_{A \rightarrow B} = -G \frac{mm'}{d^2} \vec{u}_{A \rightarrow B} = -\vec{F}_{B \rightarrow A}$$

où G est la constante de gravitation ($G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ SI) et d la distance entre les centres de ces corps.

Les forces sont appliquées aux centres de chacun des corps.

m_A et m_B en kg ; d en m ; SI : unité du système international.

Activité 10

La Terre et la Lune peuvent être considérées comme des corps à symétrie sphérique (masse de la Lune : $7,34 \cdot 10^{22}$ kg ; masse de la Terre : $5,98 \cdot 10^{24}$ kg) ; calculer la valeur de la force gravitationnelle exercée par la Terre sur la Lune.

La distance Terre-Lune est égale à 384 000 km.

Représenter sur deux schémas différents la force gravitationnelle \vec{F} exercée par la Terre sur la Lune et la force gravitationnelle \vec{F}' exercée par la Lune sur la Terre.

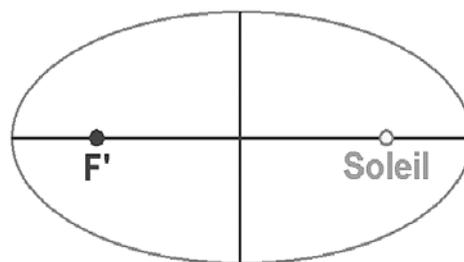
Activité 11

Le centre d'une boule de pétanque de masse m ($m = 700$ g) se trouve à 6 380 km du centre de la Terre de masse $5,98 \cdot 10^{24}$ kg. Exprimer et calculer la valeur de la force gravitationnelle exercée par la Terre sur la boule de pétanque.

c) Les lois de Kepler

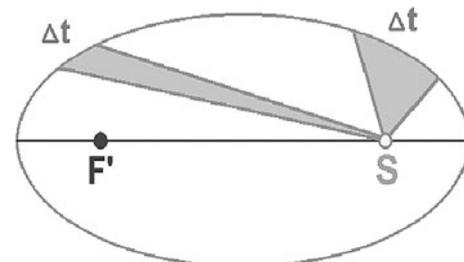
1^{ère} loi

Les planètes décrivent des ellipses dont le Soleil occupe l'un des foyers.



2^{ème} loi

Les surfaces balayées par le rayon vecteur pendant des durées égales sont égales.



3^{ème} loi

Le rapport du carré de la période T de révolution au cube du demi grand axe a de l'ellipse est constant pour toutes les planètes.

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM_s} = \text{cte}$$

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ SI}$$

$$M_s = \text{masse du Soleil}$$

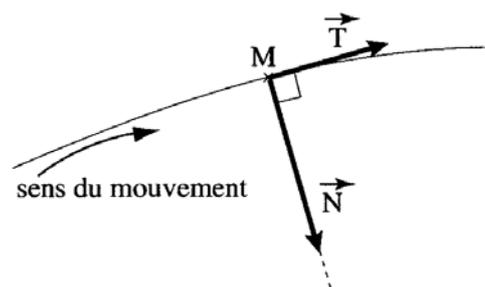
d) Étude du mouvement circulaire et uniforme

Dans l'étude de certains mouvements plans (mouvements circulaires en particulier, ...) il est intéressant d'utiliser le repère de Frenet.

Ce repère noté (\vec{T}, \vec{N}) comprend :

– le vecteur unitaire \vec{T} qui est un vecteur tangent à la trajectoire en M et orienté suivant le sens du mouvement.

– le vecteur unitaire \vec{N} qui est normal à la trajectoire en M et orienté vers le centre de courbure.



Vecteur vitesse et vecteur accélération du centre d'inertie :

Vecteur vitesse :

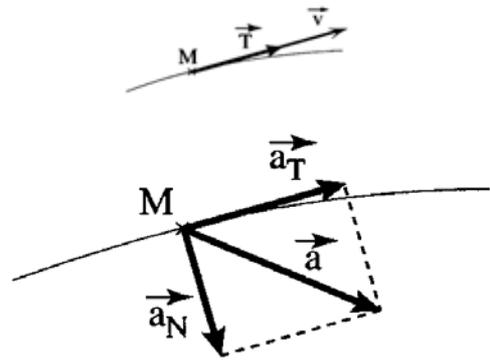
$$\vec{v}_G = v_G \vec{T}$$

Vecteur accélération :

$$\vec{a}_G = \frac{v_G^2}{R} \vec{N} + \frac{dv_G}{dt} \vec{T}$$

$$\vec{a}_N = \frac{v_G^2}{R} \vec{N}$$

$$\vec{a}_T = \frac{dv_G}{dt} \vec{T}$$



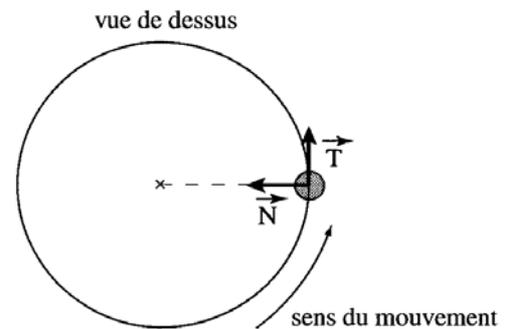
Vecteur vitesse et vecteur accélération du centre d'inertie pour un mouvement circulaire et uniforme :

Vecteur vitesse :

$$\vec{v}_G = v_G \vec{T}$$

Vecteur accélération :

$$\vec{a}_G = \frac{v_G^2}{R} \vec{N}$$



Lorsque le mouvement est circulaire et uniforme, la valeur v_G de la vitesse est constante, nous aurons

donc : $\vec{a}_G = \frac{v_G^2}{R} \vec{N}$ puisque $\frac{dv_G}{dt} = 0$; l'accélération est radiale.

Activité 12

Rechercher les conditions nécessaires pour que le mouvement du centre d'inertie d'un solide soumis à cette seule force \vec{F} soit circulaire uniforme. On appliquera la deuxième loi de Newton et on donnera une condition sur la vitesse initiale et une condition sur \vec{F} .

Notez dans le cadre ci-dessous la réponse du corrigé.

Activité 13

Pourquoi la Lune « ne tombe-t-elle pas sur la Terre » ? (on ne considérera que la force exercée par la Terre).

e) Mouvements des satellites

La chute des corps sur Terre ou le mouvement des satellites résultent de la même force : la force gravitationnelle.

La trajectoire d'un satellite artificiel de la Terre dépend de la vitesse à laquelle il a été lancé.

Le lancement s'effectue en deux phases : une première phase de montée en altitude pour échapper aux forces de frottement de l'atmosphère, suivie d'une deuxième phase de mise en orbite où la direction et la valeur de la vitesse imposent la trajectoire ultérieure.

Pour une vitesse suffisamment élevée, la courbure de la trajectoire devient équivalente à celle de la Terre : l'objet est satellisé.

Étudions le mouvement du satellite Spot qui a un mouvement circulaire autour de la Terre.

La Terre est supposée sphérique et homogène de centre d'inertie O_T ; les centres d'inertie sont situés à une distance d l'un de l'autre. On désigne par M_T la masse de la Terre, M_S la masse du satellite et G la constante de gravitation.

Le référentiel d'étude est le référentiel géocentrique considéré comme galiléen.

Inventaire des forces extérieures non négligeables : la force gravitationnelle $\vec{F}_{T \rightarrow S}$ exercée par la Terre ;

la force est **centripète** : $\vec{F}_{T \rightarrow S} = G \frac{M_S M_T}{d^2} \vec{N}$.

Nous négligeons les forces de frottement ainsi que les forces gravitationnelles exercées par les autres astres.

Dans le référentiel galiléen considéré, appliquons la deuxième loi de Newton au centre d'inertie du

satellite : $M_S \vec{a} = \vec{F}_{T \rightarrow S}$ soit dans le repère de Frenet : $M_S \vec{a} = G \frac{M_S M_T}{d^2} \vec{N} \Rightarrow \vec{a} = \frac{GM_T}{d^2} \vec{N}$

Dans le repère de Frenet, le vecteur accélération \vec{a} s'exprime par : $\vec{a} = \frac{v^2}{d} \vec{N} + \frac{dv}{dt} \vec{T} = \frac{GM_T}{d^2} \vec{N}$.

Le terme $\frac{dv}{dt}$ est donc nul ; la valeur de la vitesse est donc constante, le mouvement est uniforme.

Le mouvement du satellite est circulaire et uniforme ; le vecteur accélération est radial.

Expression de la vitesse du satellite

Des expressions de l'accélération nous obtenons : $\vec{a} = \frac{v^2}{d} \vec{N} = \frac{GM_T}{d^2} \vec{N} \Rightarrow \frac{v^2}{d} = \frac{GM_T}{d^2}$

La vitesse est donc égale à : $v = \sqrt{\frac{GM_T}{d}}$

Expression de la période de révolution du satellite

La période de révolution T_S du satellite correspond à la durée nécessaire pour parcourir un tour :

$T_S = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi d}{v}$ puisque $v = d\omega$.

Activité 14 Montrer que la période T_S vérifie la troisième loi de Kepler.

Notez la réponse du corrigé dans le cadre ci-dessous.

► **Cas des satellites géostationnaires**

Les orbites des satellites artificiels sont des ellipses, mais dans de nombreux cas l'ellipse se confond avec un cercle dont le centre est le centre de la Terre : c'est le cas des satellites géostationnaires utilisés en télécommunications qui restent en permanence à la verticale d'un même point de la Terre : ces satellites décrivent, dans le référentiel géocentrique, une orbite circulaire dans le plan équatorial, la période du mouvement étant égale à la période de rotation de la Terre sur elle-même et le sens de rotation étant le même que celui de la Terre (vers l'est).

La relation $\frac{T^2}{(R_T + h)^3} = \frac{4\pi^2}{GM_T} = \text{cte}$ (où M_T représente la masse de la Terre et R_T son rayon), est vérifiée pour tous les satellites en orbite autour de la Terre (y compris la Lune).

Activité 15

Connaissant la période d'un satellite géostationnaire : $T = 86\,164\text{ s}$ (période de rotation de la Terre sur elle-même dans le référentiel géocentrique), calculer le rayon de son orbite puis son altitude.

Notez la réponse du corrigé dans le cadre ci-dessous.

f) Mouvements des planètes

Le référentiel d'étude est le référentiel héliocentrique considéré comme galiléen.

Étudions le mouvement de la planète Mars de masse M qui a un mouvement pratiquement circulaire autour du Soleil de masse M_S de rayon d .

Inventaire des forces extérieures non négligeables : la force gravitationnelle $\vec{F}_{T \rightarrow S}$ exercée par la Terre ;

la force est **centripète** : $\vec{F} = G \frac{M_S M}{d^2} \vec{N}$.

Dans le référentiel galiléen considéré, appliquons la deuxième loi de Newton au centre d'inertie de la

planète Mars : $M\vec{a} = \vec{F}$ soit dans le repère de Frenet : $M\vec{a} = G \frac{M_S M}{d^2} \vec{N} \rightarrow \vec{a} = \frac{GM_S}{d^2} \vec{N}$.

Dans le repère de Frenet, le vecteur accélération \vec{a} s'exprime par : $\vec{a} = \frac{v^2}{d} \vec{N} + \frac{dv}{dt} \vec{T} = \frac{GM_S}{d^2} \vec{N}$.

Le terme $\frac{dv}{dt}$ est donc nul ; la valeur de la vitesse est donc constante, le mouvement est uniforme.

Nous retrouvons les mêmes résultats que pour l'étude d'un satellite de la Terre en mouvement circulaire et uniforme.

Résumé

Un mouvement rectiligne uniformément accéléré est un mouvement où la trajectoire est une droite et où le vecteur accélération est constant.

Pour l'étude du mouvement des planètes du système solaire, le référentiel considéré comme galiléen est le **référentiel héliocentrique** dont l'origine du repère est le centre d'inertie du Soleil et dont les axes sont dirigés vers des étoiles fixes.

Pour l'étude du mouvement des satellites de la Terre, le référentiel considéré comme galiléen est le **référentiel géocentrique** dont l'origine du repère est le centre d'inertie de la Terre et dont les axes sont parallèles à ceux d'un repère du référentiel héliocentrique, c'est-à-dire dirigés vers des étoiles fixes.

Loi de la gravitation universelle

Dans le cas de deux corps A et B à répartition sphérique de masse m_A et m_B , la force d'interaction gravitationnelle exercée par A sur B a pour expression :

$$\vec{F}_{A \rightarrow B} = -G \frac{mm'}{d^2} \vec{u}_{A \rightarrow B} = -\vec{F}_{B \rightarrow A}$$

où G est la constante de gravitation ($G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ SI) et d la distance entre les centres de ces corps.

1^{ère} loi de Kepler

Les planètes décrivent des ellipses dont le Soleil occupe l'un des foyers.

2^{ème} loi de Kepler

Les surfaces balayées par le rayon vecteur pendant des durées égales sont égales.

3^{ème} loi de Kepler

Le rapport du carré de la période T de révolution au cube du demi grand axe a de l'ellipse est constant

$$\text{pour toutes les planètes : } \frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM_S} = \text{cte.}$$

Pour que le mouvement du centre d'inertie d'un solide soumis à une force soit circulaire et uniforme, il faut que sa vitesse initiale ne soit pas nulle et que la force soit radiale.

E

xercices

Exercice ① La Poussée d'Archimède

Exprimer et calculer la valeur de la poussée d'Archimède exercée par de l'eau sur une bille en verre de masse m , de rayon R , à moitié immergée dans une flaque d'eau.

Données : $m = 10,9 \text{ g}$; masse volumique de l'eau : $\rho_e = 1\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; masse volumique de l'air : $\rho_a = 1,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; masse volumique du verre : $\rho_v = 2\,600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; rayon de la bille : $r = 1 \text{ cm}$.

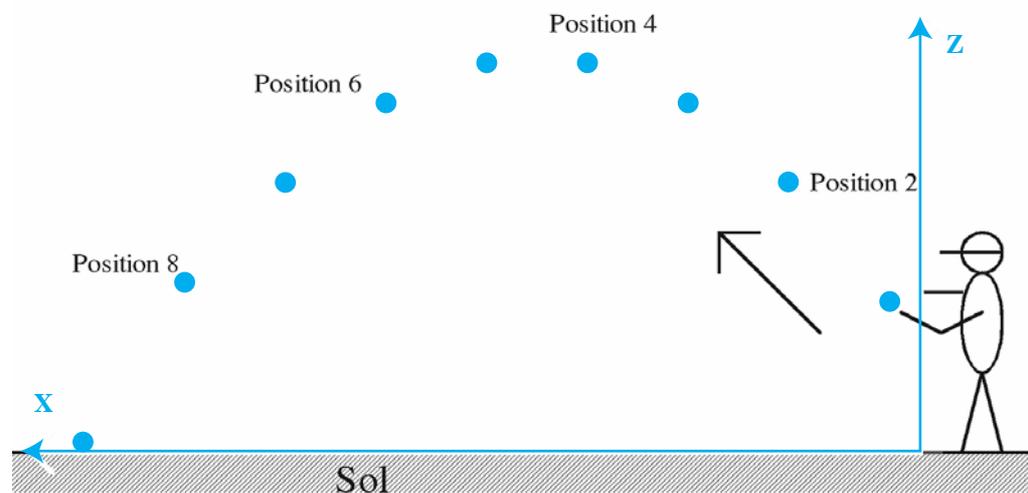
Exercice ② Vecteur accélération d'un projectile

Déterminer le vecteur accélération \vec{a}_G , du centre d'inertie dans les trois cas ci-dessous, où on négligera les forces exercées par l'air sur la bille :

- une bille est lancée dans l'air suivant la verticale vers le haut ;
- une bille est lancée dans l'air suivant la verticale vers le bas ;
- une bille est lancée dans l'air de façon quelconque.

Exercice ③ Mouvement d'une boule de pétanque

Le document ci-dessous reproduit la chronophotographie du mouvement d'une boule de pétanque (intervalle de temps τ entre deux positions représentées) ; les frottements sont négligés.



Représenter les vecteurs vitesse du centre d'inertie de la boule pour les positions 2, 4, 6 et 8 (choisir une échelle permettant de comparer la longueur des 4 vecteurs).

Représenter les vecteurs accélération du centre d'inertie de la boule pour les positions 3, 5, 7.

Comparer les trois vecteurs accélérations obtenus ; conclure en utilisant la 2^{ème} loi de Newton.

Exercice 4 Chute libre verticale d'une balle de tennis

Sur le document ci-contre, on a reproduit la chronophotographie (intervalle de temps τ) du mouvement de chute libre d'une balle de tennis de masse 57 g.

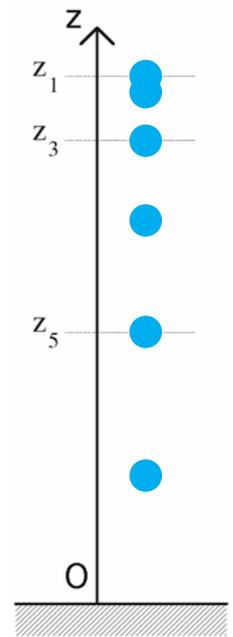
À l'altitude z_1 , la balle est immobile. Les frottements sont négligés. Dans le tableau suivant on donne l'altitude z des différentes positions de la balle.

Établir une relation entre la valeur v_G de la vitesse du centre d'inertie et l'altitude z de la balle.

Compléter le tableau.

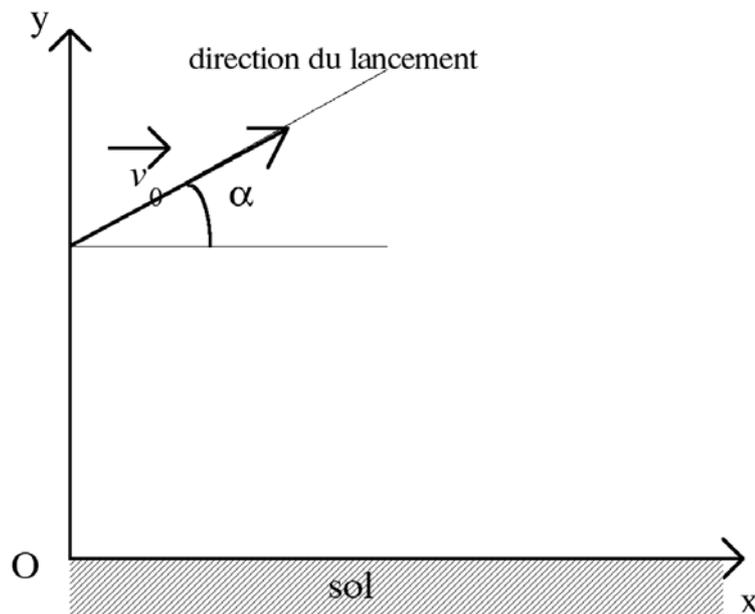
Donnée : $g = 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$.

	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5	Position 6
Altitude z (cm)	56,0	54,8	51,1	45,0	36,4	25,4
Vitesse v ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0					



Exercice 5 Lancer du « poids »

Un athlète effectue un lancer du « poids » de masse $m = 7,26 \text{ kg}$; avant le lancer, le « poids » est au repos et tenu à une altitude de 0,70 m par rapport au sol ; à l'instant de date t_0 , le « poids » quitte la main à une altitude de 1,90 m par rapport au sol et avec une vitesse \vec{v}_0 dans le plan (O, \vec{i}, \vec{j}) ; le vecteur vitesse \vec{v}_0 fait un angle α avec l'horizontale (voir schéma).



Données : $t_0 = 0 \text{ s}$; $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; $v_0 = 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; les frottements de l'air sont négligés et le champ de pesanteur est uniforme.

Établir les équations horaires du mouvement du « poids » après qu'il ait quitté la main du lanceur.

Montrer que le mouvement est plan.

En déduire l'équation littérale de sa trajectoire dans le repère (O, \vec{i}, \vec{j}) .

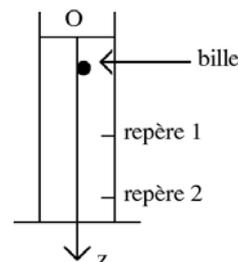
Exercice 6 Mesure de la viscosité

Dans cette partie, on étudie le mouvement de translation d'une bille d'acier de rayon r et de masse m dans de la glycérine de viscosité η .

On admettra que les actions de frottement exercées par le liquide sur la bille en mouvement sont modélisables par une force $\vec{f} = -6\pi\eta r\vec{v}$ où \vec{v} représente le vecteur vitesse de la bille.

Données : masse volumique de l'acier : $\rho = 7\,800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; masse volumique de la glycérine : $\rho_0 = 1\,260 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

On dépose la bille en O sans vitesse initiale dans la glycérine contenue dans une grande éprouvette.



- 1 Faire le bilan des forces exercées sur la bille plongeant dans la glycérine en précisant le référentiel de travail.
- 2 Si l'on applique le principe des interactions, quelle est la force réciproque du poids de la bille ?
- 3 Établir l'équation différentielle donnant la valeur de la vitesse \vec{v} du centre d'inertie de la bille.
- 4 Montrer que la vitesse de la bille tend vers une vitesse limite \vec{v}_{lim} telle que :

$$v_{\text{lim}} = \|\vec{v}_{\text{lim}}\| = \frac{2(\rho - \rho_0)g}{9\eta} r^2.$$

Donner l'expression du temps caractéristique τ du mouvement.

- 5 On mesure cette vitesse limite pour différents rayons de la bille ; la vitesse limite est mesurée entre les deux repères notés sur la figure.

r (mm)	1,50	1,60	1,75	2,00	2,25
v_{lim} ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	5,2	5,9	7,1	9,1	11,5

En déduire la viscosité η de la glycérine.

Calculer la constante de temps pour $r = 1,5 \text{ mm}$ et conclure sur le caractère observable du phénomène.

Exercice 7 Chute d'une bille dans l'air avec frottements

Dans cette partie, on étudie le mouvement de translation d'une bille d'acier de masse m dans de l'air. On admettra que les actions de frottement exercées par l'air sur la bille en mouvement sont modélisables par une force $\vec{f} = -kv^2\vec{u}_z$ où v représente la vitesse de la bille et k un coefficient dépendant de la masse volumique de l'air, de l'aire A de la surface de la bille perpendiculaire au mouvement, ...

$$k = \frac{C_x \rho A}{2}.$$

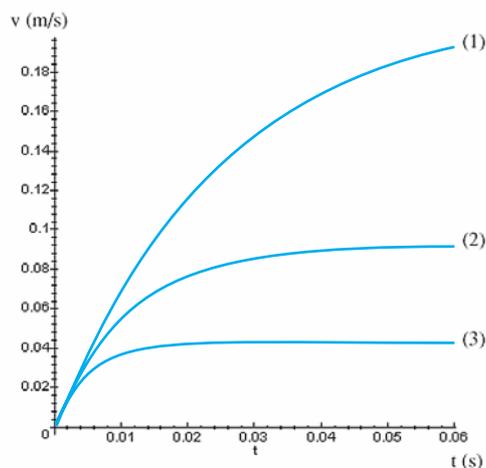
- 1 Établir l'équation différentielle donnant la valeur v de la vitesse du centre d'inertie de la bille. On posera : $v_i = \sqrt{\frac{mg}{k}}$.
- 2 Proposer une méthode pour résoudre numériquement cette équation différentielle.

Exercice 8 Influence de la viscosité sur la chute d'un objet

Dans cette partie, on étudie la chute verticale d'une bille (de rayon r , de masse volumique ρ et de masse m) dans des liquides de viscosité η et de masse volumique ρ_0 différentes.

On admettra que les actions de frottement exercées par le liquide sur la bille en mouvement sont modélisables par une force $\vec{f} = -6\pi\eta r\vec{v}$ où \vec{v} représente le vecteur vitesse de la bille.

On dépose la bille sans vitesse initiale dans le liquide contenu dans une grande éprouvette et on mesure la vitesse de la bille en fonction du temps.



Représenter sur le schéma pour la chute (3) les régimes initial et asymptotique.

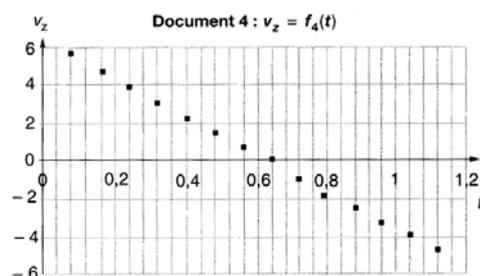
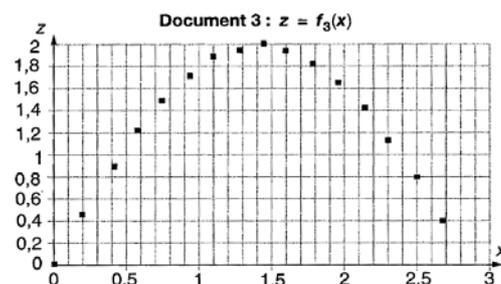
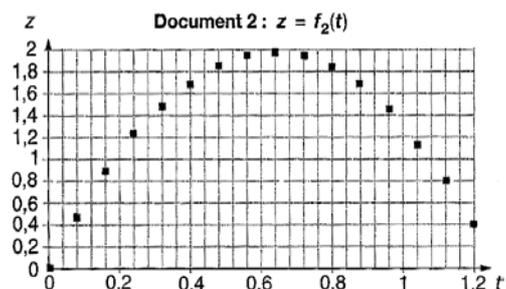
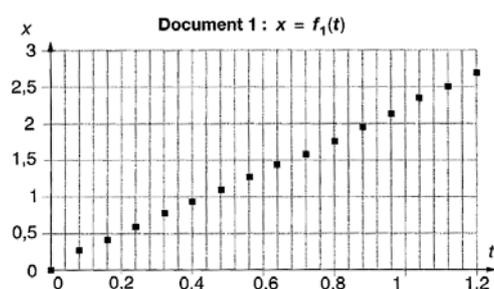
Quelle est la courbe qui représente la chute dans le liquide le plus visqueux ? Justifier votre réponse.

Exercice 9 **Balle de tennis**

On étudie le mouvement d'une balle de tennis considérée comme un point matériel.

Ce mouvement est filmé avec un caméscope dont l'axe de visée est perpendiculaire au plan de la trajectoire. Le film est ensuite observé, image par image, sur l'écran d'un téléviseur à l'aide d'un magnétoscope.

En s'aidant d'un quadrillage posé sur cet écran, on relève les coordonnées x et z de l'image de la balle. L'axe Ox est horizontal, l'axe Oz est vertical ascendant. La première image est prise à la date $t = 0$, et on considère qu'à cette date les coordonnées x et z sont nulles. Le caméscope enregistrant 25 images par seconde, la date des autres images est alors connue. Les valeurs de x , z et t sont entrées dans un fichier puis traitées par un logiciel adapté. Celui-ci permet de tracer les différents graphes figurant sur les documents ci-après.



Questions

Sur les documents, toutes les valeurs numériques sont exprimées avec les unités du système S.I.

L'étude est faite dans le référentiel terrestre.

Les documents 1, 2, 3 et 4 représentent respectivement $x = f_1(t)$, $z = f_2(t)$, $z = f_3(x)$ et $v_z = f_4(t)$.

- 1 Parmi ces quatre courbes, laquelle représente la trajectoire de la balle ? Justifier la réponse.
- 2 a) D'après le graphe $x = f_1(t)$ quelle est la nature du mouvement de la projection de la balle sur l'axe Ox ?
b) Calculer la valeur de la composante v_x du vecteur vitesse.
- 3 Calculer la valeur de la composante $v_z(0)$ du vecteur vitesse à la date $t = 0$, en précisant le graphe utilisé.
- 4 Calculer la valeur α de l'angle de tir à $t = 0$.

Exercice 10 Force gravitationnelle et force de pesanteur

Données : $m = 58 \text{ g}$; $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ SI}$; rayon de la Terre : $R_T = 6\,380 \text{ km}$; masse de la Terre : $M_T = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$; $g = 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$.

- 1 Exprimer et calculer la valeur de la force d'interaction gravitationnelle \vec{F} exercée par la Terre sur une balle de tennis de masse m en mouvement.
- 2 Exprimer et calculer la valeur du poids de la balle de tennis.

Exercice 11 Collision entre la Terre et le satellite Météosat

- 1 Faire un schéma comprenant la Terre et la trajectoire circulaire du satellite ; représenter sur ce schéma la force gravitationnelle exercée par la Terre sur le satellite.
- 2 Pourquoi le satellite Météosat n'entre-t-il pas en collision avec la Terre alors qu'il subit la force gravitationnelle exercée par la Terre ?

Exercice 12 Interaction entre le Soleil et la planète Mars

La planète Mars et le Soleil peuvent être considérés comme des corps à symétrie sphérique.

Données : masse de la planète Mars : $6,42 \cdot 10^{23} \text{ kg}$; masse du Soleil : $1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$; distance moyenne Mars-Soleil : $2,28 \cdot 10^8 \text{ km}$; $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ SI}$.

- 1 a) Représenter la force gravitationnelle exercée par la planète Mars sur le Soleil. Déterminer sa valeur.
b) Représenter la force gravitationnelle exercée par le Soleil sur la planète Mars. Sa valeur est-elle identique à celle de la force exercée par Mars sur le Soleil ?
- 2 Rappeler les trois lois de Képler.
- 3 Calculer la période de révolution T de Mars autour du Soleil en considérant que la trajectoire est pratiquement circulaire.

Exercice 13 Interaction entre la Terre et la Lune

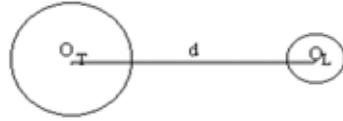
La Terre et la Lune sont supposées sphériques et homogènes de centres d'inertie respectifs O_T et O_L ; les centres d'inertie sont situés à une distance d l'un de l'autre ($d = 384\,000 \text{ km}$).

On désigne par : R_T le rayon de la Terre ($R_T = 6\,380 \text{ km}$), M_T la masse de la Terre ($M_T = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$), R_L le rayon de la Lune ($R_L = 1\,738 \text{ km}$), M_L la masse de la Lune ($M_L = 7,38 \cdot 10^{22} \text{ kg}$), G la constante de gravitation universelle ($G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ SI}$), g_{T0} l'intensité du champ gravitationnel terrestre à l'altitude zéro ($g_{T0} = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$).

- 1 a) Exprimer la valeur (l'intensité) du champ de pesanteur terrestre à l'altitude zéro g_{T0} par rapport à la Terre ; montrer que cette intensité est égale à la valeur donnée.
b) Exprimer la valeur (l'intensité) du champ de pesanteur à l'altitude zéro g_{L0} par rapport à la Lune.

- ② Exprimer et calculer l'intensité $F_{T \rightarrow L}$ de la force de gravitation exercée par la Terre sur la Lune ; en déduire l'intensité $F_{L \rightarrow T}$ de la force de gravitation exercée par la Lune sur la Terre (on justifiera la réponse).

Représenter ces deux forces sur un schéma.



- ③ a) Le mouvement de la Lune par rapport à la Terre est étudié dans le référentiel géocentrique ; ce mouvement est supposé circulaire (on néglige l'action du Soleil par rapport à celle de la Terre) ; en utilisant la deuxième loi de Newton appliquée au centre d'inertie, montrer que ce mouvement est uniforme.
- b) Exprimer la valeur v_L de la vitesse du centre d'inertie de la Lune sur son orbite en fonction de G , M_T et d ; calculer cette valeur.
- c) Exprimer la période de révolution de la Lune autour de la Terre en fonction de d et v_L ; calculer sa valeur numérique.

Exercice ⑭ Télescope Hubble

On désigne par : R le rayon de la Terre supposée sphérique et homogène ($R = 6\,300\text{ km}$), M la masse de la Terre, G la constante de gravitation universelle, g_0 l'intensité du champ gravitationnel à l'altitude zéro ($g_0 = 9,81\text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$), z l'altitude d'un point.

Le télescope spatial Hubble a été mis sur orbite circulaire autour du centre T de la Terre. Il évolue à une altitude z_H ($z_H = 600\text{ km}$).

Ce télescope, objet pratiquement ponctuel par rapport à la Terre, est noté H et a une masse m ($m = 12 \cdot 10^3\text{ kg}$). Les images qu'il fournira seront converties en signaux électriques et acheminées vers la Terre via des satellites en orbite circulaire à une altitude égale à z_G ($z_G = 35\,800\text{ km}$).

- ① Appliquer la loi de gravitation universelle au télescope situé à l'altitude z et exprimer la valeur de la force de gravitation qu'il subit en fonction de m , g_0 , R et z .

Calculer la valeur de cette force pour $z = z_H = 600\text{ km}$.

- ② Le mouvement du télescope est étudié dans le repère géocentrique dont l'origine est T ; ce mouvement est circulaire et uniforme.
- a) Exprimer la vitesse v du télescope sur son orbite en fonction de R , g_0 et z puis la calculer en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ et en km/h quand $z = z_H = 600\text{ km}$.
- b) Exprimer et calculer la période de révolution T_H du télescope.

Exercice ⑮ La microgravité

Le texte et le schéma qui suivent sont extraits d'une revue de vulgarisation. Vous pouvez vous aider de façon critique de ces deux documents pour répondre aux questions posées.

« À la surface de la Terre, tout corps subit une accélération à peu près constante de $9,8\text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, due à la gravité, désignée par g . C'est cette accélération qui donne la sensation de pesanteur. Lors du lancement de la navette spatiale, les astronautes subissent une accélération égale à « $3g$ », ils ont la sensation de peser trois fois plus qu'au sol. Quand ils atteignent une altitude d'environ 350 km et restent en orbite autour de la Terre, on dit qu'ils sont en « microgravité ». En fait, à cette altitude, l'attraction terrestre, tout en étant inférieure, est du même ordre de grandeur que celle qui existe à la surface terrestre. Bien qu'il facilite la compréhension de la sensation éprouvée en orbite terrestre, ce terme de « microgravité » est trompeur, pour ne pas dire incorrect !...

Si les astronautes et leur vaisseau étaient réellement en « zéro g », les lois de la mécanique indiqueraient qu'il leur serait impossible de rester sur orbite. Leur trajectoire rectiligne les éloignerait du voisinage de la Terre en raison de leur vitesse élevée. C'est précisément la présence du puissant champ

gravitationnel terrestre qui permet au vaisseau spatial, à condition que sa vitesse horizontale au moment où il quitte sa fusée ne soit ni trop faible, ni trop forte, de rester sur une trajectoire stable, qui en général est une ellipse, mais qui peut être un cercle.

Une fois cette vitesse atteinte, la propulsion peut être arrêtée parce qu'à cette altitude il y a un vide poussé et qu'à partir de ce moment, il n'y a pratiquement plus de frottement pour ralentir le vaisseau spatial, ou, du moins, pas avant longtemps. »

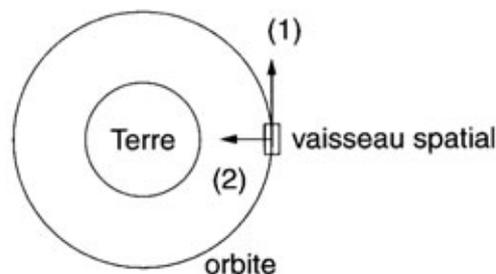
L'échelle entre le rayon de la Terre et celui de l'orbite circulaire n'est pas respectée il en est de même pour la taille du vaisseau spatial.

Données complémentaires :

Vitesse d'un satellite sur une orbite circulaire :

$$v = \sqrt{\frac{gR_T^2}{r}} ; \quad \text{rayon de la Terre :}$$

$$R_T = 6\,400 \text{ km .}$$



Questions

I) Le référentiel

Préciser dans quel référentiel l'étude des satellites terrestres est réalisée.

II + III) La gravitation pour un satellite

À partir des données de l'énoncé, montrer par un calcul que pour un satellite gravitant sur une orbite de rayon r correspondant à l'altitude mentionnée dans le texte, la phrase : « En fait, à cette altitude, l'attraction terrestre, tout en étant inférieure, est du même ordre de grandeur que celle qui existe à la surface terrestre. Bien qu'il facilite la compréhension de la sensation éprouvée en orbite terrestre, ce terme de microgravité est trompeur, pour ne pas dire incorrect !... » est bien correcte.

III) L'étude du mouvement d'un satellite

Les flèches (1) et (2) du schéma peuvent représenter soit un vecteur force, soit un vecteur vitesse, soit un vecteur accélération.

a) Dans le cas d'un satellite sur orbite circulaire de rayon r , indiquer dans un tableau analogue au tableau ci-dessous, la (les) case(s) correspondante(s) à la (aux) bonne(s) réponse(s).

	Force	Vitesse	Accélération
(1)			
(2)			

b) Pour chaque case cochée, donner pour un satellite de masse m , l'expression de la grandeur en question.

c) Démontrer la relation donnant la vitesse v d'un satellite sur une orbite circulaire, et montrer que le mouvement est uniforme. Un schéma indiquant le repère utilisé pour cette étude est exigé.

Calculer la vitesse v correspondant à l'altitude de satellisation 350 km.

d) Déterminer l'expression de la période de révolution du satellite ; la calculer à l'altitude de 350 km.

IV) L'expression « zéro g »

« ... Si les astronautes et leur vaisseau étaient réellement en zéro g , les lois de la mécanique indiqueraient qu'il leur serait impossible de rester sur orbite. Leur trajectoire, rectiligne, les éloignerait du voisinage de la Terre en raison de leur vitesse élevée... »

a) Que signifie l'expression utilisée dans le texte : « zéro g » ?

b) Justifier que la trajectoire serait rectiligne « si les astronautes et leur vaisseau étaient réellement en « zéro g ».

Chimie

Objectifs

- ▶ Schématiser une pile.
- ▶ Utiliser le critère d'évolution spontanée pour déterminer le sens de déplacement des porteurs de charges dans une pile.
- ▶ Interpréter le fonctionnement d'une pile en disposant d'une information parmi les suivantes : sens de circulation du courant, f.é.m., réactions aux électrodes, polarité des électrodes ou mouvement des porteurs de charges.
- ▶ Écrire les réactions aux électrodes et relier les quantités de matière des espèces formées ou consommées à l'intensité du courant et à la durée de la transformation, dans les piles et lors d'une électrolyse.
- ▶ Savoir que l'électrolyse est une transformation forcée.
- ▶ Connaissant le sens du courant, imposé par le générateur, identifier l'électrode où se produit la réaction d'oxydation (anode) et l'électrode où se produit la réaction de réduction (cathode).

Dans un bécher, on met en présence de la poudre de fer dans une solution bleue d'ions cuivre (II). Au bout de quelques minutes d'agitation, on note l'apparition d'un dépôt de couleur rouge sur la poudre grise de fer, ainsi que la décoloration de la solution.

Activité ①

- ① Quelles conclusions peut-on faire ?
- ② Quels sont les couples rédox intervenant ici ?
- ③ Écrire l'équation de la réaction associée à la transformation spontanée subie par le système.

Lors de la transformation spontanée, nous pouvons dire qu'il s'est produit un **transfert spontané d'électrons** entre les espèces Fe et Cu^{2+} .

Une **réaction d'oxydo-réduction** a lieu lorsque parmi les réactifs ; il y a au moins un atome d'une molécule (le **réducteur**) qui perd un ou plusieurs électrons, et un autre atome qui les accepte, l'**oxydant**.

De la même manière, si on plonge une lame de cuivre dans une solution d'ions argent (I), on voit apparaître un dépôt noir sur la lame de cuivre.

La réaction, d'équation : $2\text{Ag}^+ + \text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{Ag}$ se produit.

Un transfert spontané d'électrons s'est produit entre les espèces Ag^+ et Cu.

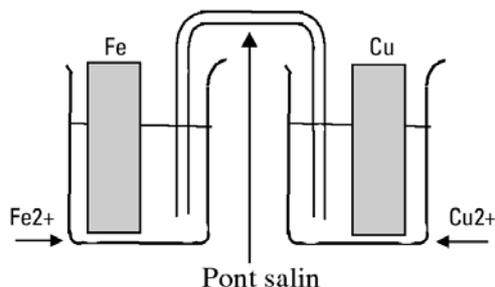
A Constitution

Revenons sur l'exemple choisi précédemment : la réaction d'oxydoréduction entre les couples Fe^{2+}/Fe et Cu^{2+}/Cu .

Mais cette fois, les espèces chimiques présentes initialement (fer en poudre et ions cuivre (II)) ne sont plus mélangés mais séparés ; en effet, dans un premier récipient, on plonge une lame de fer métal dans une solution d'ions fer (II), tandis que dans un autre récipient, une lame de cuivre (métal) plonge dans une solution d'ions cuivre (II).

Pour observer la circulation d'un courant électrique entre les 2 lames métalliques, il faut que l'ensemble des 2 récipients forme un circuit fermé : nécessité de relier les 2 solutions conductrices (électrolytes) par un pont lui-même conducteur : le pont salin.

Le tout forme une pile :



Le pont salin est constitué d'un tube en verre creux en forme de U et rempli d'un électrolyte sous forme de gel ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$ ou $\text{K}^+ + \text{Cl}^- \dots$).

Cette pile (ou générateur électrochimique) est constituée de 2 demi-piles. Un récipient contenant une électrode plongeant dans un électrolyte forme une demi-pile. De plus, à chaque demi-pile correspond un couple d'oxydoréduction.

On peut schématiser la pile de la façon suivante :



Le pont salin est symbolisé par : //

Comment réaliser soi-même une pile zinc-cuivre ?

Remplir un petit récipient en plastique avec de l'eau du robinet, ajoutez un ou deux cristaux de sel. Percez le couvercle de deux trous, dans le premier y mettre un fil de cuivre rigide (~ 5 cm) et dans l'autre une tige de zinc de 5 cm aussi (un clou galvanisé peut faire l'affaire). Mettez le couvercle en place, la pile est constituée. Mesurez avec un voltmètre électronique, le + côté cuivre, cela donne 0,8 à 0,9 volt. La quantité de courant disponible est très faible, mais avec deux piles en série, elles peuvent faire fonctionner une petite horloge avec affichage à cristaux liquides pendant plusieurs semaines. Si la pile faiblit, changez l'eau et si nécessaire, nettoyez les deux métaux.

B Fonctionnement

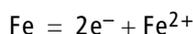
Afin d'observer puis d'interpréter (expliquer) le fonctionnement de la pile fer-cuivre, relient les 2 électrodes via un ampèremètre en série avec une résistance R.

En reliant la borne + de l'ampèremètre à l'électrode de cuivre, on détecte un courant (noté positivement sur l'écran à cristaux liquides). De plus, on constate l'apparition d'un dépôt rouge sur l'électrode de cuivre.

Activité 2

- 1 Refaire le schéma de la pile reliée à l'ampèremètre et la résistance et indiquer le sens (conventionnel) du courant.
- 2 En déduire le mouvement des porteurs de charges dans le fil extérieur à la pile.
- 3 Identifier le pôle + puis le pôle – de cette pile.

L'électrode de fer constitue le pôle – ; cela signifie que des électrons apparaissent sur cette électrode avec formation d'ions fer (II) : Fe^{2+} , il se produit donc la réaction :



À l'électrode négative se produit une réaction d'oxydation. C'est pour cela que, dans une pile, l'électrode négative s'appelle l'anode.

Activité 3

Écrire l'équation de la réaction se produisant à l'électrode positive (cathode).

Dans les électrolytes, les ions sont porteurs de charges. Sur l'anode, des atomes de fer Fe perdent chacun 2 électrons et se transforment en ions fer Fe^{2+} , tandis que dans le compartiment cathodique, des ions cuivre Cu^{2+} viennent au contact de la cathode prendre chacun 2 électrons et se transforment en atome de cuivre Cu.

D'où l'apparition de cuivre métal sur la cathode.

Le pont salin permet à la pile de fonctionner en fermant le circuit et en assurant l'électroneutralité dans chaque électrolyte.

Si l'on remplace l'ensemble ampèremètre + résistance par un voltmètre, on peut mesurer la force électromotrice (f.é.m.) de la pile, c'est-à-dire la tension entre ses bornes lorsqu'elle ne débite pas (courant nul ou quasi-nul).

Ainsi lorsque la concentration initiale en électrolyte dans chaque compartiment est égale à $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, la f.é.m. mesurée est : $E = 0,78 \text{ V}$ en connectant la borne + du voltmètre à l'électrode de cuivre.

On vérifie que la borne + de la pile est bien l'électrode de cuivre et que le sens conventionnel du courant se fait bien de l'électrode de cuivre vers l'électrode de fer (à l'extérieur de la pile).

C Évolution spontanée du système

Dans le cas de la pile fer-cuivre, nous avons vu son schéma simplifié :

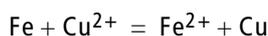


Le pôle – est souvent placé à gauche (et le pôle +, à droite).

À l'électrode négative se produit l'oxydation : $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$

À l'électrode positive se produit la réduction : $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$

Nous pouvons écrire alors l'équation de la réaction globale se produisant dans la pile :



Cette équation de réaction est associée à une transformation spontanée.

Calculons la valeur du quotient de réaction, dans le cas où les concentrations initiales des ions en solution sont : $[\text{Fe}^{2+}] = [\text{Cu}^{2+}] = 0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Activité 4

- 1 Donner l'expression du quotient Q_r de la réaction globale de la pile.
- 2 Calculer sa valeur.

La pile est le siège d'une transformation spontanée. Les électrons échangés au cours de la réaction traversent le circuit extérieur, ce qui permet de récupérer de l'énergie (électrique). La pile est donc un générateur électrochimique.

Une pile débite ainsi du courant entre ses deux électrodes jusqu'à ce que sa f.é.m. devienne nulle ; la pile est dite « usée » : elle ne fournit plus de courant (ou d'énergie électrique). Cela signifie que l'état du système correspondant à la pile usée est l'état d'équilibre.

Une pile constitue donc un système hors équilibre au cours de son fonctionnement en générateur.

D'après l'équation de la réaction globale, au cours du fonctionnement de la pile, les ions Cu^{2+} sont consommés, tandis que les ions Fe^{2+} sont formés.

Activité 5 *Vers quelle valeur limite tend chaque concentration d'ions ?*

En supposant que la transformation est totale, la constante d'équilibre K de la réaction globale possède une valeur très élevée (puisque $[\text{Cu}^{2+}]$ tend vers 0).

Ainsi, à l'état initial (avant que la pile ne fonctionne), $Q_r < K$, donc le sens spontané de la transformation subie par le système est le sens direct.

Lors de l'évolution spontanée du système (pile en fonctionnement), la valeur du quotient de réaction Q_r tend vers la valeur de la constante d'équilibre.

Lorsque la pile est usée : $Q_r = K$.

Nous pouvons calculer alors la quantité d'électricité maximale débitée dans le circuit extérieur (qui peut être tout récepteur électrique comme une résistance (ampoule de lampe) ou un moteur (jouet)).

En partant sur les conditions initiales précédentes : électrolytes de volume 100 mL chacun, concentrations initiales des ions en solution sont : $[\text{Fe}^{2+}] = [\text{Cu}^{2+}] = 0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, on déduit qu'à l'équilibre, tous les ions Cu^{2+} ont été consommés.

Activité 6 ① *À l'aide de l'équation de la réaction se produisant à l'électrode de cuivre, calculer la quantité d'électrons échangés entre les 2 bornes de la pile.*

② *En déduire la quantité d'électricité maximale débitée par la pile dans le circuit extérieur.*

Donnée : 1 faraday = 96 500 C .

A Mise en évidence expérimentale

L'eau constitue le solvant dans lequel se déroulent toutes les réactions envisagées dans ce cours.

Cependant, l'eau pure peut être considérée comme non conductrice du courant car elle contient très peu d'ions dissous. Toutefois, lorsqu'on y ajoute quelques gouttes d'acide sulfurique (ou d'hydroxyde de sodium ou d'autres composés ioniques), l'eau devient conductrice et son électrolyse est alors possible.

Réalisons le montage suivant :

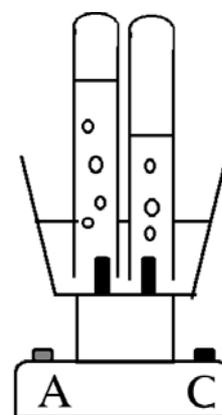
Dans une cuve (appelée électrolyseur) versons une solution aqueuse d'acide sulfurique (eau + quelques gouttes d'acide concentré) et imposons une tension d'environ 6 V entre les deux électrodes de platine.

On constate qu'un dégagement gazeux se produit à chaque électrode. Des éprouvettes graduées permettent de recueillir ces gaz.

De plus, le volume de gaz qui se dégage à l'électrode négative est le double de celui qui apparaît à l'électrode positive.

Identification des gaz :

Le gaz le plus abondant, recueilli à l'électrode négative, explose à l'approche d'une flamme. Le gaz obtenu à l'électrode positive, ravive l'incandescence d'une bûchette.



Activité 7 Identifier chaque gaz recueilli.

Réaction aux électrodes :

Les couples d'oxydo-réduction présents sont : $\text{H}_3\text{O}^+/\text{H}_2$ et $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$.

Activité 8 Écrire les équations des réactions se produisant aux électrodes et permettant d'expliquer les observations expérimentales (nature et proportions des gaz).

L'équation de la réaction globale est donc : $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$

(attention : pas d'électrons dans l'équation globale, car pas d'électrons libres en solution).

Cette réaction est la réaction inverse de la réaction de synthèse de l'eau (exemple envisagé dans la séquence 1).

Or, la réaction de synthèse de l'eau est associée à une transformation spontanée, donc la transformation se produisant ici dans l'électrolyseur (décomposition de l'eau) est donc associée à une transformation qui n'est pas spontanée : on parle alors de **transformation forcée** : on « force » la transformation à se faire, grâce à l'électrolyse.

Nous allons généraliser ce résultat et dire que, lors d'une électrolyse, le générateur impose à l'électrolyseur une réaction associée à une transformation forcée.

C'est la réaction inverse de celui obtenu pour une pile.

On peut, dans certains cas, changer le sens d'évolution d'un système en imposant un courant de sens inverse à celui observé lorsque le système évolue spontanément.

Cependant, lors d'une électrolyse, comme dans le cas des piles, l'anode est l'électrode qui est le siège d'une oxydation, tandis que la cathode est le siège d'une réduction.

Citons, pour terminer le cas de phénomènes naturels comme la respiration et la photosynthèse des plantes :



La nuit, la transformation spontanée se fait dans le sens inverse, tandis que le jour, sous l'effet de l'énergie apportée par la lumière, la transformation forcée (sens direct) est prépondérante.

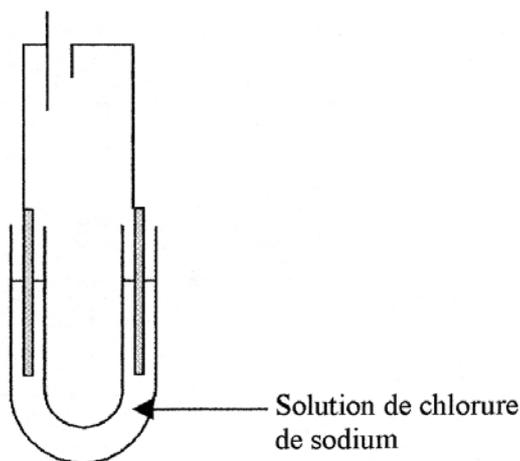
B Applications

Électrolyse de la solution de chlorure de sodium

Dans un tube en U, réalisons l'électrolyse d'une solution aqueuse de chlorure de sodium avec électrodes en carbone (graphite).

On observe un dégagement gazeux à chaque électrode, mais nettement plus abondant sur la cathode : H_2 , tandis qu'à l'anode le gaz identifié est du dichlore Cl_2 .

De plus, dans l'électrolyte au voisinage de la cathode, la phénolphtaléine rosit.



Les couples rédox présents sont : $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$ et Cl_2/Cl^- .

Activité 9

- 1 La phénolphtaléine rosit. Que peut-on en déduire ? Écrire les équations des réactions se produisant aux électrodes puis l'équation globale.
- 2 Retrouver le sens du courant dans le circuit extérieur.

Cette électrolyse présente un grand intérêt économique, puisqu'elle constitue une des préparations industrielles du dichlore ; de plus, on récupère du dihydrogène ainsi qu'une solution concentrée d'hydroxyde de sodium.

Accumulateurs au plomb

Inventés en 1859 par le français G. Planté, les accumulateurs au plomb sont les accumulateurs les plus utilisés : batteries d'automobiles, engins de levage, installations de secours des hôpitaux...).

L'accumulateur est un appareil qui convertit de l'énergie chimique en énergie électrique et réciproquement. En effet si les piles ont une décharge irréversible, l'accumulateur se recharge avec de l'énergie électrique.

Un accumulateur est un appareil qui emmagasine de l'énergie électrique sous forme chimique pour la restituer, à volonté, sous forme de courant. Les principaux accumulateurs d'utilisation courante sont : la batterie, la pile sèche et la pile à combustible. Les accumulateurs produisent du courant continu ; ils constituent une source d'énergie portable.

L'application, aux bornes d'un accumulateur, d'une différence de potentiel adéquate crée un courant qui modifie la composition de ses constituants par un phénomène d'électrolyse (fonctionnement en accumulateur). Lorsque le sens des réactions qui se produisent en son sein est inversé, l'accumulateur restitue les charges accumulées, fonctionnant alors comme une pile. Les accumulateurs, comme les piles sont composés de cellules élémentaires mettant en œuvre des couples rédox. Ils sont regroupés en batteries (en série ou en parallèle) pour obtenir les caractéristiques requises (tension, courant).

Une cuve isolante contient l'électrolyte : acide sulfurique + de l'eau : ($\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$) et deux électrodes (en plomb Pb) dont les surfaces vont chimiquement se combiner avec l'électrolyte (les deux plaques se transforment en sulfate de plomb : PbSO_4). À ce stade, il n'y a pas de différence de potentiel entre elles.

Lors de la **charge**, on raccorde une **électrode** au pôle positif et l'autre au pôle négatif de la source de tension continue. Un courant peut s'établir créant une **électrolyse**. Les plaques se modifient chimiquement (la plaque positive devient un bioxyde de plomb – PbO_2 – et la plaque négative du plomb pur – Pb). L'électrolyte voit sa quantité d'acide sulfurique augmenter et sa densité augmenter. À la fin de la charge, on mesure une f.é.m. d'environ 2 V entre les deux électrodes.

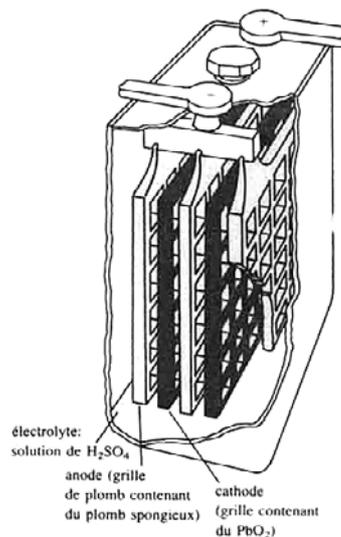
Lors de la **décharge** (raccordement d'un récepteur sur les électrodes) un courant électrique s'établit. Il est de sens contraire à celui de la charge. Les transformations chimiques seront également inversées : les deux électrodes se retransforment en sulfate de plomb. La densité de l'électrolyte diminue.

La **capacité** d'un accumulateur est la quantité d'électricité qu'il peut stocker, usuellement exprimée en ampères-heures ($1 \text{ A} \cdot \text{h} = 3\,600 \text{ C}$).

Les batteries courantes ont des capacités de 40 à 200 A · h . Pour les hôpitaux, la capacité peut aller jusqu'à 10 000 A · h !!

Les conditions de charge (vitesse, température) d'un accumulateur sont importantes, car elles influent d'une part sur la tension qu'il peut délivrer et d'autre part sur sa durée de vie.

Les batteries de voiture comportent 6 éléments de 2 V de f.é.m. chacun, soit 12 V au total.

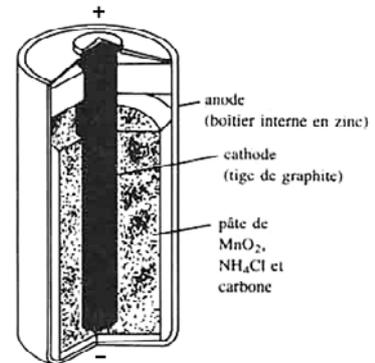


Comparaison des caractéristiques de quelques piles

Les piles sèches sont petites et très efficaces.

Dans sa version **saline** (acide), la pile sèche comporte un boîtier intérieur en zinc qui joue le rôle d'anode et un bâton de graphite entouré d'une pâte humide de MnO_2 solide et de NH_4Cl solide, qui joue le rôle de cathode. La f.é.m. de cette pile est d'environ 1,5 volt.

Dans la version **alcaline** de cette pile, on a remplacé NH_4Cl solide par de l'hydroxyde de potassium KOH ou de l'hydroxyde de sodium $NaOH$. Les piles alcalines durent plus longtemps que les piles acides, car l'anode de zinc est moins sujette à la corrosion en milieu basique qu'en milieu acide.



- Activité 10**
- 1 Quel est la principale différence au niveau structure entre les 2 types de piles ?
 - 2 Quel est l'avantage des piles alcalines sur les piles salines ?

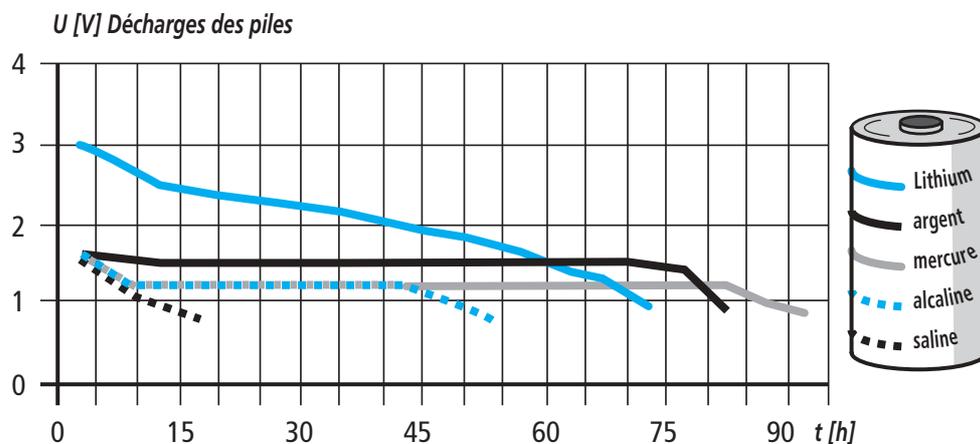
Comparatif des caractéristiques de quelques piles

TYPE DE PILE	E [V]	ÉNERGIE [Wh/kg]
saline	1,5	75
alcaline	1,5	125
mercure	1,35	175
lithium	1,5 ; 3 ou 3,6	325

- Activité 11** Quel est l'autre avantage des piles alcalines par rapport aux piles salines ?

Bien entendu, il faut tenir compte aussi du coût (des matières premières et de la fabrication).

Tableau comparatif de décharge des piles



- Activité 12**
- 1 Quel est le type de pile qui a la durée de vie la plus longue ?
 - 2 Quel principal inconvénient présente cette pile ?

Résumé

Une **réaction d'oxydo-réduction** a lieu lorsque parmi les réactifs il y a au moins un atome d'une molécule (le **réducteur**) qui perd un ou plusieurs électrons, et un autre atome qui les accepte, l'**oxydant**.

Lors de la transformation spontanée, nous pouvons dire qu'il s'est produit un **transfert spontané d'électrons** entre les espèces chimiques mises en présence. Ces espèces appartiennent à 2 couples rédox.

Une pile (ou générateur électrochimique) est constituée de 2 demi-piles. Un récipient contenant une électrode plongeant dans un électrolyte forme une demi-pile. De plus, à chaque demi-pile correspond un couple d'oxydo-réduction.

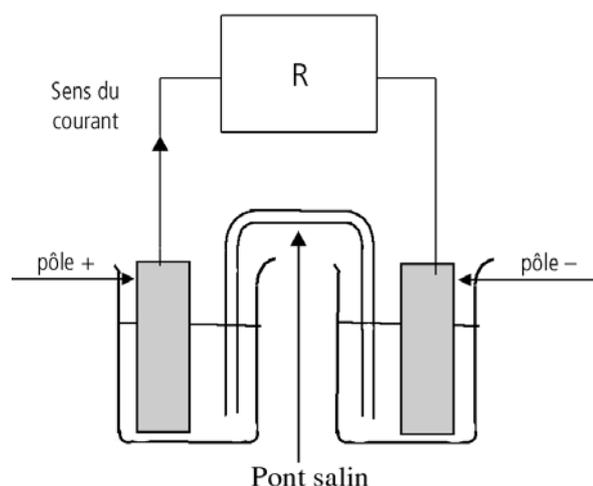
On peut schématiser la pile de la façon suivante :



Le pont salin est symbolisé par : //.

À l'**électrode négative** (appelée aussi : anode) se produit une réaction d'**oxydation**.

À l'**électrode positive** (appelée aussi : cathode) se produit une réaction de **réduction**.



Le pont salin permet à la pile de fonctionner en fermant le circuit et en assurant l'électroneutralité dans chaque électrolyte.

À l'aide d'un voltmètre, on peut mesurer la force électromotrice (f.é.m.) de la pile, c'est-à-dire la tension entre ses bornes lorsqu'elle ne débite pas (courant nul ou quasi-nul).

Nous pouvons écrire alors l'**équation de la réaction globale** se produisant dans la pile : c'est la somme des réactions se produisant aux électrodes (sans faire apparaître d'électrons).

Cette équation de réaction est associée à une transformation spontanée.

La pile est le siège d'une **transformation spontanée**. Les électrons échangés au cours de la réaction traversent le circuit extérieur, ce qui permet de récupérer de l'énergie (électrique). La pile est donc un **générateur électrochimique**.

Une pile débite ainsi du courant entre ses deux électrodes jusqu'à ce que sa f.é.m. devienne nulle ; la pile est dite « usée » : elle ne fournit plus de courant (d'énergie électrique). Cela signifie que l'état du système correspondant à la **pile usée est l'état d'équilibre**.

Une pile constitue donc un **système hors équilibre au cours de son fonctionnement en générateur**.

Lors de l'évolution spontanée du système (pile en fonctionnement), la valeur du quotient de réaction Q_r tend vers la valeur de la constante d'équilibre. Lorsque la pile est usée : $Q_r = K$.

Lors d'une **électrolyse**, le générateur impose à l'électrolyseur une réaction associée à une **transformation forcée**. C'est le résultat inverse de celui obtenu pour une pile.

On peut, dans certains cas, changer le sens d'évolution d'un système en imposant un courant de sens inverse à celui observé lorsque le système évolue spontanément.

Cependant, lors d'une électrolyse, comme dans le cas des piles, l'anode est l'électrode qui est le siège d'une oxydation, tandis que la cathode est le siège d'une réduction.

Exercices

Exercice ❶ Pile Leclanché

On considère une pile Leclanché plate de 4,5 V pouvant débiter une intensité $I = 20 \text{ mA}$ pendant une durée $t = 100$ heures .

La réaction de fonctionnement est : $2\text{MnO}_2 + 2\text{H}^+ + \text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{MnO}(\text{OH})$.

- ❶ Quelle est la borne négative ?
- ❷ Quelle est la quantité d'électricité mise en jeu ?
- ❸ Quelles sont les masses minimales de réactifs nécessaires ?
- ❹ Quelle est l'énergie que peut fournir la pile ? Quelle est sa puissance ?

Données : masses molaires ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$) : $\text{Mn} = 55$; $\text{O} = 16$; $\text{Zn} = 65,4$. Couples redox $\text{MnO}_2/\text{MnO}(\text{OH})$ et Zn^{2+}/Zn

Exercice ❷ Accumulateur nickel – cadmium

La capacité d'un accumulateur nickel cadmium est 1,6 Ah. Les couples en présence sont : $\text{NiO}(\text{OH})/\text{Ni}(\text{OH})_2$ et $\text{Cd}(\text{OH})_2/\text{Cd}$. Le milieu est basique. Le cadmium s'oxyde.

- ❶ Écrire les réactions aux électrodes puis la réaction de fonctionnement.
- ❷ Quelle est la borne négative ?
- ❸ Quelle est la quantité d'électricité mise en jeu en coulombs ?
- ❹ Quelles sont les masses minimales de réactifs nécessaires ?
- ❺ Quelle est l'énergie que peut fournir la pile, sachant que la tension U à ses bornes est égale à 1,2 V ?

Données : masses molaires ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$) : $\text{Ni} = 58,7$; $\text{H} = 1$; $\text{Cd} = 112,4$; $\text{O} = 16$.

Exercice ❸ Accumulateur au plomb

Sur un accumulateur, on peut lire : 12 V ; 40 Ah ; 250 A. Les couples en présence sont $\text{PbO}_2/\text{PbSO}_4$ et PbSO_4/Pb . Le milieu est l'acide sulfurique concentré. Le plomb s'oxyde.

- ❶ Combien d'éléments sont associés et comment, sachant que chaque élément possède 2 V de tension ?
- ❷ Écrire les réactions aux électrodes puis la réaction de fonctionnement.
- ❸ Quelle est la borne négative ?
- ❹ Quelle est la quantité d'électricité mise en jeu en coulombs ?
- ❺ Quelles sont les masses minimales de réactifs nécessaires ?
- ❻ Quelle est l'énergie que peut fournir la pile ? Si l'intensité $I = 10 \text{ A}$, quelle est la durée de fonctionnement ?

Données : masses molaires ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$) : $\text{Pb} = 207$; $\text{H} = 1$; $\text{S} = 32$; $\text{O} = 16$.

Exercice ❹ Pile zinc-air

Couples mis en jeu ZnO/Zn et O_2/OH^- , milieu alcalin. Le zinc s'oxyde et O_2 se réduit.

- ❶ Écrire l'équation de fonctionnement.
- ❷ La f.é.m est $E = 1,4 \text{ V}$; la capacité : 54 Ah ; intensité $I = 1,4 \text{ mA}$. Quelle est la durée de fonctionnement ?
- ❸ Quelles sont la masse de zinc disparue ($M_{\text{Zn}} = 65,4$) et le volume de O_2 consommé ? ($24 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$) .

Exercice 5 Électrolyse d'une saumure et préparation Cl₂

Une saumure est une solution concentrée de chlorure de sodium. Les électrodes sont inattaquables. À l'anode les ions chlorure s'oxydent en dichlore Cl₂. À la cathode l'eau est réduite en dihydrogène.

- 1 Écrire les réactions aux électrodes puis la réaction de fonctionnement.
- 2 Quelle est la quantité d'électricité mise en jeu si $I = 50\,000\text{ A}$ et $t = 1\text{ heure}$?
- 3 Quelles sont les masses et volumes des gaz formés ?
- 4 Quelle est l'énergie consommée par tonne de dichlore formé ? ($U = 4\text{ V}$)

Données : masses molaires ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$) : H = 1 ; O = 16 ; Na = 23 ; Cl = 35,5, volume molaire $30\text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Exercice 6 Nickelage : dépôt de nickel sur un autre métal

- 1 On ne peut pas obtenir un dépôt de nickel sur le cuivre par simple trempage dans une solution de sulfate de nickel. Aussi faut-il procéder à une électrolyse. Décrire le dispositif.
- 2 L'aire de l'objet à nickeler est $S = 400\text{ cm}^2$, l'épaisseur du dépôt est $e = 20\text{ microns}$. Quelle est la masse de nickel nécessaire ?
- 3 Quelle est la quantité de matière d'électrons ?
- 4 Quelle est la durée du nickelage si $I = 2\text{ A}$?

Donnée : Couples : Cu²⁺/Cu et Ni²⁺/Ni ; $M_{\text{Ni}} = 58,7\text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, masse volumique du nickel : $\rho = 8\,900\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Exercice 7 Électrolyse de l'alumine

La bauxite contient environ 55 % en masse d'alumine Al₂O₃. À 950 °C, l'électrolyse de l'alumine fondue (électrodes en carbone) donne :

à l'anode : $\text{O}^{2-} \rightarrow 1/2\text{O}_2 + 2\text{e}^-$ et à la cathode : $\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al}$.

- 1 Écrire l'équation bilan de l'électrolyse.
- 2 Quel est le volume de dioxygène par mole d'aluminium produit ?
- 3 Quelle est la masse de bauxite à extraire pour produire 1 tonne d'aluminium ?
- 4 Quelle est l'énergie consommée par tonne d'aluminium produite si $U = 4,5\text{ V}$?

Données : masses molaires ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$) : Al = 27 ; H = 1 ; O = 16 ; Cl = 35,5 $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$, volume molaire = $100\text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$. ■

Séquence

8

> **Physique :**

**Systemes oscillants
mécaniques**

> **Chimie :**

**Les réactions d'estérification
et d'hydrolyse d'un ester**

Physique > Systèmes oscillants mécaniques

Chapitre 1	>	Présentation de divers systèmes oscillants	275
		A Pendule pesant ; pendule simple	
		B Amortissement dans le cas du système solide-ressort	
Chapitre 2	>	Le dispositif solide-ressort	280
		A Force de rappel exercée par un ressort	
		B Étude dynamique du système solide-ressort horizontal	
Chapitre 3	>	Le phénomène de résonance	283
		A Présentation du phénomène	
		B Exemples de résonances mécaniques	
Résumé	>		286
Exercices	>		287

Chimie > Les réactions d'estérification et d'hydrolyse d'un ester

Chapitre 1	>	Les esters	299
Chapitre 2	>	La réaction d'estérification	300
		A Définition	
		B Caractéristiques de la réaction	
Chapitre 3	>	La réaction d'hydrolyse d'un ester	302
		A Définition	
		B Caractéristiques de la réaction	
Chapitre 4	>	L'équilibre d'estérification- hydrolyse	303
Chapitre 5	>	Contrôle de la vitesse de réaction	304
		A Rôle de la température	
		B Rôle d'un catalyseur	
Chapitre 6	>	Contrôle de l'État final d'un système	305
		A Influence des proportions initiales des réactifs sur l'état d'équilibre	
		B Élimination d'un produit	
Résumé	>	.....	307
Exercices	>	.....	308

Physique

Objectifs

- ▶ Savoir définir un pendule simple et connaître l'expression de la période propre.
- ▶ Connaître les caractéristiques de la force de rappel exercée par un ressort.
- ▶ Savoir appliquer la deuxième loi de Newton au solide dans le cas d'un dispositif oscillant horizontalement et savoir effectuer la résolution analytique de l'équation différentielle.
- ▶ Connaître le phénomène de résonance mécanique.

Présentation de divers systèmes oscillants

Un phénomène est dit périodique lorsqu'il se reproduit identique à lui-même à intervalles de temps successifs égaux appelés périodes. Parmi les phénomènes périodiques, certains se caractérisent par la variation d'une grandeur physique autour d'une valeur moyenne, ces phénomènes sont dits oscillants.

Ainsi, le mouvement du balancier d'une horloge est un mouvement périodique oscillant qui se produit de part et d'autre de la position de repos verticale.

L'intervalle de temps nécessaire à une oscillation du balancier s'appelle la période ; elle est notée T . La période s'exprime en seconde (s).

La fréquence f est l'inverse de la période : $f = \frac{1}{T}$; elle s'exprime en hertz (Hz).

Sa valeur représente le nombre de périodes par unité de temps. Dans le système international d'unités, on exprime la période en secondes et la fréquence en hertz (Hz).

Activité 1 Les phénomènes suivants peuvent-ils être considérés comme périodiques ? oscillants ?

- 1 Le mouvement de rotation uniforme d'un moteur.
- 2 Suspension d'une voiture.
- 3 Rotation de la Terre sur elle-même dans le référentiel géocentrique.
- 4 Mouvement du piston dans un cylindre de moteur à explosion.
- 5 Vibration du sol au passage d'un TGV.

A Pendule pesant ; pendule simple

La première horloge mécanique est apparue au $X^{\text{ème}}$ siècle ; Galilée imagine en 1638 d'utiliser les propriétés d'un pendule simple pour perfectionner le mécanisme de régulation des horloges.

L'horloge à balancier sera mise au point ensuite par Huyghens.

Le balancier d'une horloge s'appelle en physique un pendule pesant qui est plus difficile à étudier que le pendule simple.

Nous allons, comme Galilée, étudier les propriétés de ce pendule simple dans le paragraphe qui suit.

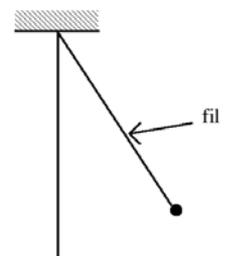
1 Définition du pendule simple

Un pendule est constitué par un petit objet attaché au bout d'un fil, l'autre extrémité du fil est fixe.

Vous pouvez construire un pendule avec du fil à coudre et un petit objet (bille en fer, morceau de plomb, ...). Suspendez l'autre extrémité du fil avec une pince à linge. Écartez le pendule et lâchez-le.

Au cours du mouvement, l'objet repasse régulièrement par les mêmes positions ; on dit qu'il oscille ou qu'il effectue des oscillations.

Lorsque le fil est rigide, de longueur constante, de masse négligeable par rapport à celle de la boule et lorsque les dimensions de la boule sont très faibles par rapport à la longueur du fil, le pendule est appelé pendule simple.



2 Écart à l'équilibre

L'amplitude des oscillations correspond à l'angle maximum de la direction du fil avec la verticale. La verticale correspond à la position d'équilibre du pendule. L'angle φ mesure l'écart à l'équilibre du pendule. La position d'équilibre du pendule se justifie en utilisant la deuxième loi de Newton.

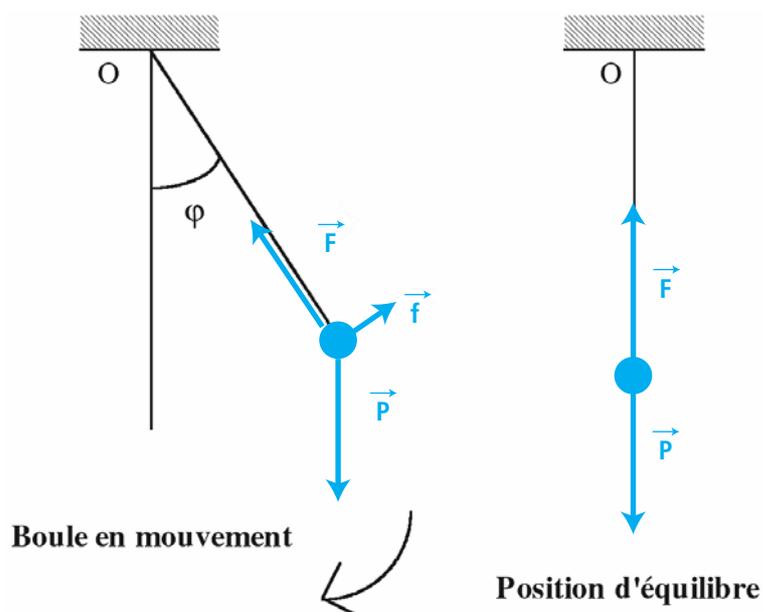
Les forces appliquées à la boule sont :

- ▶ le poids \vec{P} ,
- ▶ la force \vec{F} exercée par le fil (cette force a pour direction le fil puisque la masse du fil est négligeable),
- ▶ la force de frottement \vec{f} exercée par l'air sur la boule lorsqu'elle est en mouvement.

Dans le référentiel terrestre considéré comme galiléen, appliquons la deuxième loi de Newton au centre d'inertie de la boule :

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

Lorsque la bille est en équilibre, $\vec{a}_G = \vec{0}$, $\vec{f} = \vec{0}$ soit : $\vec{P} + \vec{F} = \vec{0}$ (voir schéma ci-dessous).



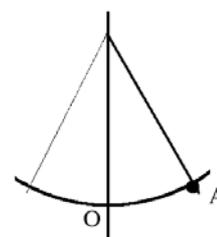
3 Période propre du pendule simple

Activité 2 On souhaite mesurer la période d'une oscillation d'un pendule simple.

On dispose d'un chronomètre, d'un fil de longueur connue, d'une bille accrochée au fil et on suspend le tout à un point fixe.

On lâche le pendule en A ; quelle méthode parmi les trois proposées ci-dessous vous paraît la plus fiable pour mesurer cette période ? Justifier votre réponse.

- On déclenche le chronomètre lorsque la bille passe en O et on arrête la mesure lorsqu'elle repasse en O après une oscillation.
- On déclenche le chronomètre lorsque la bille passe en O et on arrête la mesure lorsqu'elle repasse en O après dix oscillations ; il suffit de diviser la durée par dix.
- On déclenche le chronomètre lorsque la bille revient en A et on arrête la mesure lorsqu'elle repasse en A après une oscillation.



→ **Influence de la longueur du fil**

Activité 3 Plusieurs mesures de la période T ont été effectuées pour des longueurs, de fil différentes :

ℓ (m)	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60
T (s)	1,56	2,21	2,70	3,12	3,49	3,82

On souhaite montrer que la période T et la longueur ℓ vérifient bien cette formule ; on utilisera le tableur d'un ordinateur (ou une feuille de papier millimétré et la calculatrice).

- ① Tracer T en fonction de ℓ ; obtient-on une droite ?
- ② a) Calculer $\sqrt{\ell}$ pour chaque valeur du tableau.
b) Tracer T en fonction de $\sqrt{\ell}$; obtient-on une droite ?
- ③ Laquelle des deux courbes tracées permet de trouver rapidement une relation simple entre la période T et la longueur ℓ .

Notez votre réponse dans le cadre ci-dessous.

→ Influence de la masse de la boule et de l'écart à l'équilibre

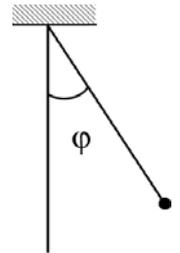
Activité 4

- ① Plusieurs mesures de la période T ont été effectuées pour des pendules de masses différentes mais de même longueur (50 cm) :

m (g)	T (s)
50 g	1,42
100 g	1,43
150 g	1,42

La masse influe-t-elle sur la période du pendule simple ?

- ② On considère un pendule constitué par un objet de masse m ($m = 50$ g) et un fil de longueur 27 cm. On augmente l'amplitude des oscillations, c'est-à-dire l'angle φ et on mesure la période T .



φ (°)	8	10	15	20	30	40
T (s)	1,04	1,04	1,05	1,06	1,09	1,12

Pour quelles valeurs de l'angle φ , la valeur mesurée de la période est indépendante de l'angle initial ?

Notez votre réponse dans le cadre ci-dessous.

La période des oscillations est indépendante des caractéristiques de la boule et indépendante de l'amplitude des oscillations tant que cette amplitude reste faible, c'est-à-dire tant que l'angle maximum de la direction du fil avec la verticale n'excède pas une dizaine de degrés.

Les seuls paramètres susceptibles d'avoir une influence sur la période des oscillations sont donc la longueur ℓ du fil et la valeur du champ de pesanteur puisque le mouvement se fait sous l'action du poids de la bille.

Pour des petites oscillations, la période propre des oscillations ne dépend pas de l'angle initial dont on écarte le pendule de sa position d'équilibre ; la période T est définie par : $T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$ où g est l'intensité de la pesanteur en $\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$, ℓ en m, T en s.

Activité 5 On reprend l'activité 3.

- 1 Déterminer le coefficient directeur de la droite obtenue précédemment.
- 2 À quoi correspond ce coefficient directeur dans la formule $T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$? En déduire la valeur de g .
- 3 Cette expérience a-t-elle été faite sur la Terre ou sur la Lune ?

Données : sur la Lune : $g = 1,62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; sur la Terre : $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Activité 6 → Analyse dimensionnelle

Justifier l'expression de la période par analyse dimensionnelle.

B Amortissement dans le cas d'un système solide-ressort

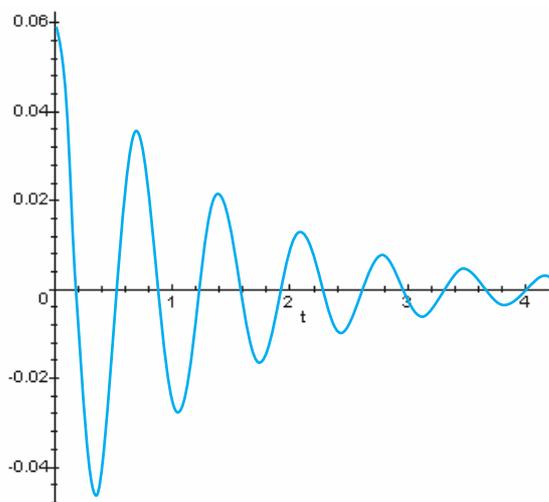
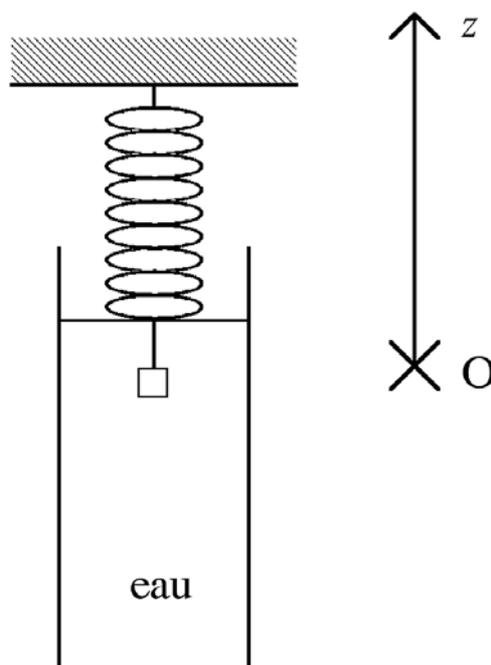
Lorsqu'on laisse le pendule simple du paragraphe précédent osciller, l'amplitude des oscillations diminue au cours du temps ; les frottements ne sont pas rigoureusement nuls.

Nous allons étudier les oscillations d'un système solide-ressort vertical.

À un ressort vertical accroché à un support, on suspend un objet de masse m et on le fait osciller verticalement de part et d'autre de sa position de repos (point O).

On enregistre les positions de l'objet.

Si l'on place l'objet dans de l'eau par exemple, on obtient la courbe suivante représentant z en fonction du temps.



L'amplitude des oscillations diminue peu à peu. Ces oscillations sont appelées pseudo-périodiques, T étant la pseudo-période ; nous avons un régime pseudo-périodique.

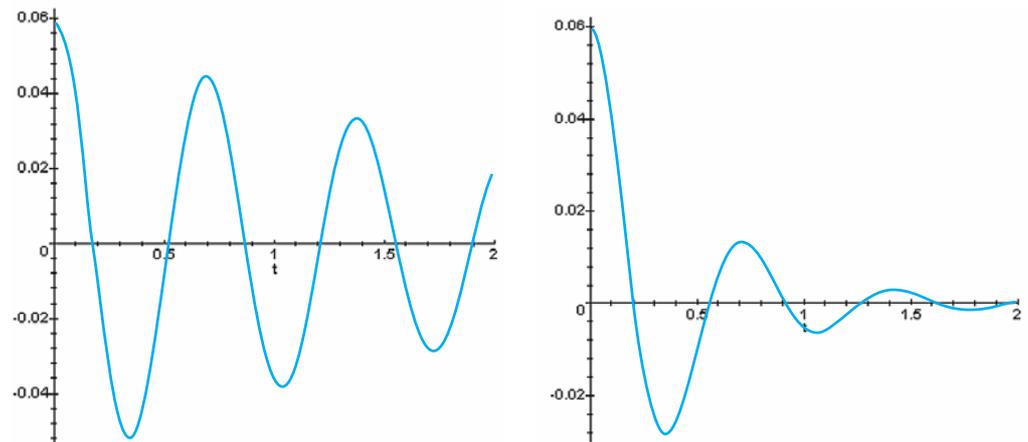
Activité 7 Déterminer la pseudo-période du mouvement sur l'enregistrement ci-dessus.

Comparer à la période propre de l'oscillateur sachant que celle-ci a pour valeur : $T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$.

Données : $k = 19,6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$; $m = 237,6 \text{ g}$.

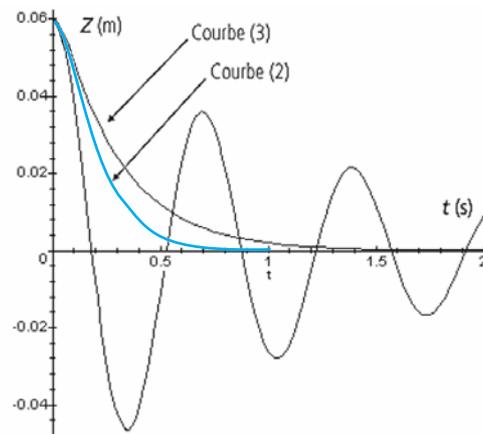
Notez la conclusion dans le cadre ci-dessous.

Activité 8 Deux enregistrements ont été réalisés avec des amortissements différents.



- 1 Quelle est la courbe correspondant à l'amortissement le plus important ? Quelle est l'influence de l'amortissement sur l'amplitude des oscillations ?
- 2 Déterminer la pseudo-période du mouvement pour chaque enregistrement.

Augmentons les frottements.



Si les frottements augmentent et atteignent une valeur limite dite valeur critique, le mobile accroché au ressort n'oscille plus mais regagne simplement sa position d'équilibre (courbe 2) ; nous avons un régime critique.

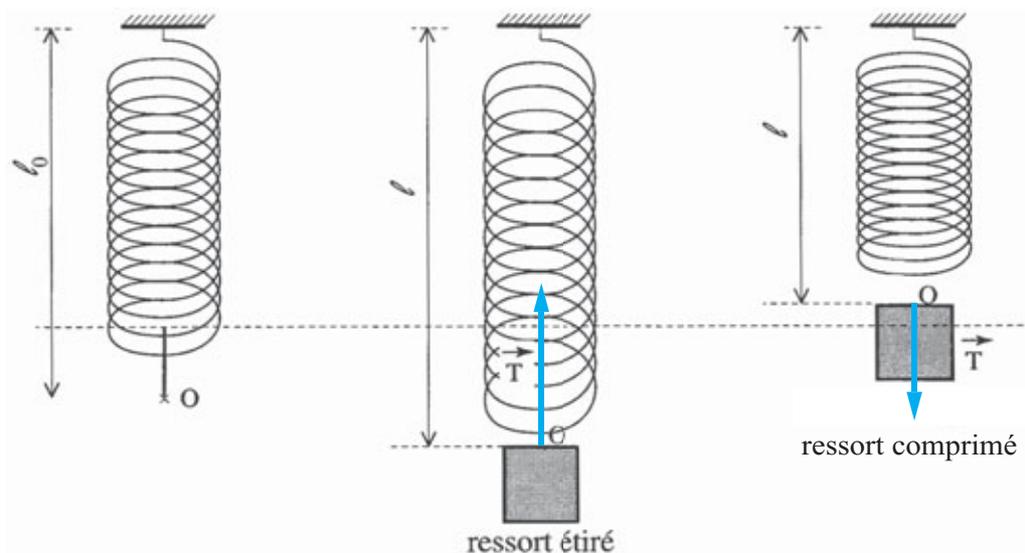
Si les frottements sont encore plus grands que cette valeur critique (on place de la glycérine dans l'éprouvette par exemple), un phénomène analogue se produit ; la masse rejoint la position d'équilibre d'autant plus lentement que les frottements sont importants (courbe 3) ; nous avons un régime aperiodique.

A Force de rappel exercée par un ressort

Considérons l'action exercée par un ressort (à spires non jointives considéré comme parfait) sur un objet suspendu à ce ressort ; cette action est modélisée par une force \vec{T} (appelée aussi tension du ressort) qui a pour caractéristiques :

- sa direction : celle de l'axe du ressort (appelée droite d'action ou support de la force),
- son sens : de O vers le haut si le ressort est étiré (de O vers le bas si le ressort est comprimé),
- sa valeur (ou intensité) est proportionnelle à l'allongement $|\Delta\ell| = |\ell - \ell_0|$ du ressort : $T = k|\Delta\ell| = k|\ell - \ell_0|$.

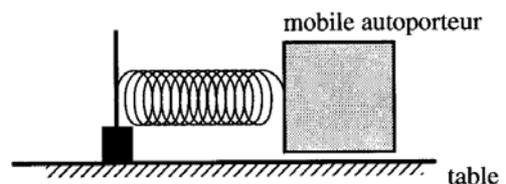
Le vecteur force \vec{T} est appliqué au point de contact O.



k est la constante de raideur du ressort (k s'exprime en $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$) ; ℓ longueur du ressort ; ℓ_0 : longueur à vide du ressort.

La relation de proportionnalité entre la valeur de la force exercée par le ressort sur l'objet et l'allongement du ressort n'existe que si le ressort est à spires non jointives.

Activité 9 *Un ressort horizontal à spires non jointives a une longueur à vide ℓ_0 ($\ell_0 = 15 \text{ cm}$) et une constante de raideur k ($k = 30 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$) ; une de ses extrémités est fixée sur une table horizontale ; l'autre est reliée à un mobile autoporteur.*



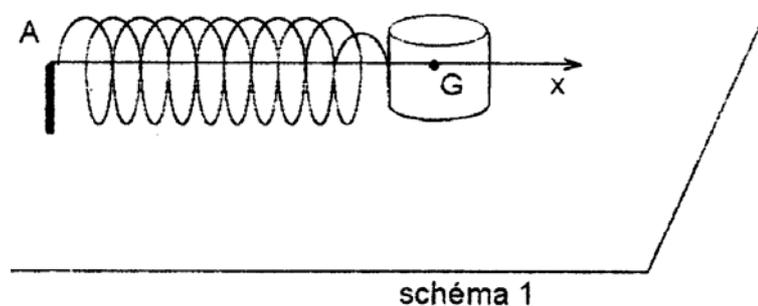
À un instant de date t , la longueur ℓ du ressort est de 20 centimètres. Déterminer les caractéristiques de la force exercée par le mobile autoporteur sur le ressort ; représenter cette force sur un schéma.

B

Étude dynamique du système solide-ressort horizontal

Le schéma (1) ci-dessous représente un mobile autoporteur attaché à un ressort dont l'autre extrémité est fixée en un point A.

Nous allons étudier les oscillations de ce système en ne considérant que les mouvements pour lesquels le centre d'inertie G du mobile se déplace sur un axe noté Ax.



On étudie le mouvement de translation rectiligne du mobile dans le référentiel terrestre considéré comme galiléen.

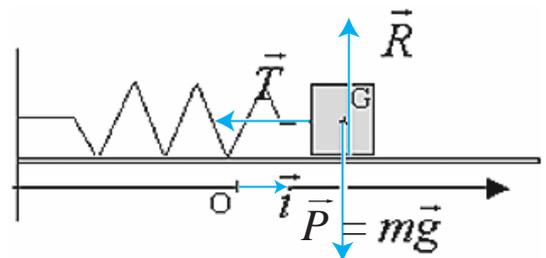
① Deuxième loi de Newton appliquée au centre d'inertie du mobile

Les forces appliquées au mobile autoporteur, sont :

- ▶ le poids \vec{P} du mobile,
- ▶ la force \vec{R} modélisant l'action d'un coussin d'air,
- ▶ la force \vec{T} exercée par le ressort.

Exprimons la somme vectorielle des forces :

$\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{P} + \vec{R} + \vec{T}$; nous admettrons que les frottements lors du déplacement sont négligeables ; en effet, le mobile autoporteur éjecte par sa base de l'air sous pression, ce qui lui permet de se déplacer sur coussin d'air donc pratiquement sans frottement ; les deux forces \vec{P} et \vec{R} se compensent : $\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{T}$.



Activité ⑩

Reprenre le schéma (2) et représenter les forces en considérant que les frottements ne sont pas négligeables et que le mobile se déplace vers la gauche.

Dans le référentiel galiléen considéré, appliquons la deuxième loi de Newton au centre d'inertie G :

$$m \vec{a}_G = \sum \vec{F}_{\text{ext}} \text{ avec } \sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{T} \Rightarrow m \vec{a}_G = \vec{T}.$$

On projette cette relation vectorielle sur l'axe Ox, O étant la position de repos du centre d'inertie G ($\ell - \ell_0$) = x :

$$m \frac{d^2x}{dt^2} \vec{i} = -k(\ell - \ell_0) \Rightarrow m \frac{d^2x}{dt^2} \vec{i} = -kx \vec{i} \Rightarrow m \frac{d^2x}{dt^2} + kx = 0 \quad \text{soit} \quad \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m} x = 0.$$

Nous obtenons une équation différentielle du même type que celle obtenue pour une décharge oscillante d'un condensateur dans une bobine : $\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{1}{LC} q = 0$.

2 Résolution analytique de l'équation différentielle

On pose : $\omega_0^2 = \frac{k}{m} \rightarrow \frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2x = 0$.

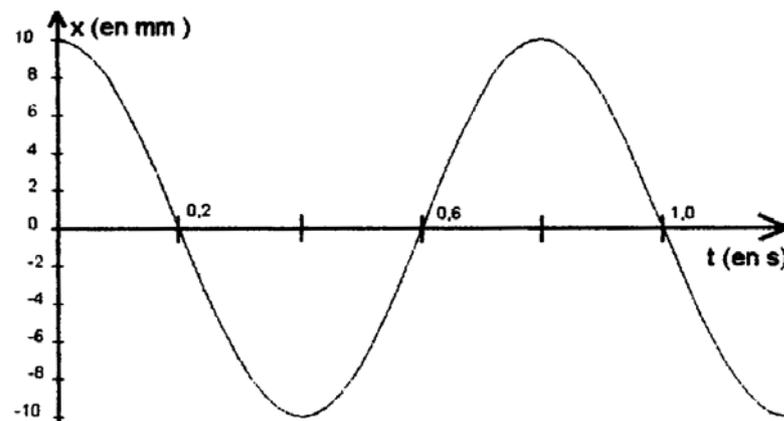
La solution de cette équation différentielle est de la forme : $x = X_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$; X_m et φ sont déterminés par les conditions initiales.

X_m correspond à l'amplitude des oscillations ; elle s'exprime en mètre (m).

φ est la phase à l'origine en radian.

ω_0 est la pulsation propre du système ressort-solide en radian par seconde (s^{-1}).

L'enregistrement obtenu montre que le mouvement est sinusoïdal.



Activité 11

On considère le ressort horizontal à spires non jointives de l'activité 9 de longueur à vide ℓ_0 ($\ell_0 = 15$ cm) et de constante de raideur k ($k = 30$ N · m⁻¹) ; une de ses extrémités est fixée sur une table horizontale ; l'autre est reliée à un mobile autoporteur. On néglige les frottements.

À l'instant de date $t = 0$, le ressort est écarté d'une longueur ℓ_1 ($\ell_1 = 20$ cm) et lâché sans vitesse initiale.

La solution de l'équation différentielle donnant l'élongation $x = \ell - \ell_0$ est de la forme :

$x = X_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$; déterminer X_m et φ dans ce cas.

3 Période propre

L'élongation x est sinusoïdale de période : $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$; T_0 est appelée période propre de l'oscillateur.

La période propre des oscillations ne dépend pas de leur amplitude.

Activité 12

Déterminer la période propre de l'enregistrement ci-dessus.

Activité 13

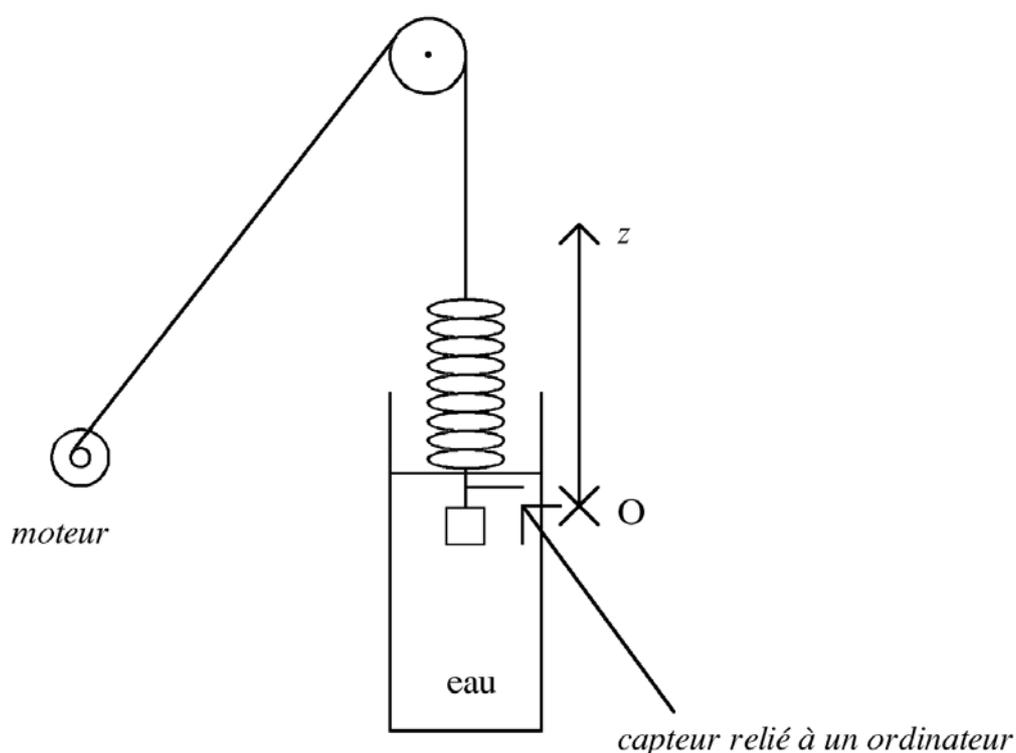
Vérifier l'homogénéité de la période propre par analyse dimensionnelle.

A Présentation expérimentale du phénomène

1 Excitateur, résonateur

Dans cette partie, nous « forçons » le système ressort-solide à osciller à une fréquence f par l'intermédiaire d'un fil relié à l'arbre d'un moteur ; l'arbre du moteur et le fil associé joue le rôle d'excitateur pour le système.

► Schéma du montage



Activité 14 On impose un régime forcé au système solide-ressort ; la fréquence de l'excitateur est de $0,80 \text{ Hz}$.

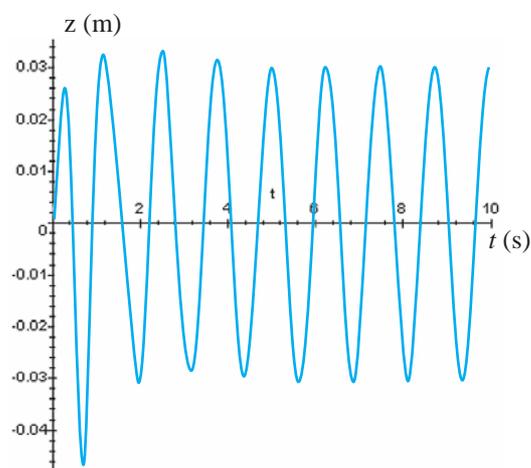
Observez la courbe suivante donnant l'enregistrement de l'amplitude des oscillations en fonction du temps à la mise en route du moteur ; le système ressort-solide est dans sa position d'équilibre à $t = 0$.

En combien de temps le régime forcé est-il établi ?

Quelle est l'amplitude des oscillations forcées ?

Quelle est la période des oscillations forcées ?
Quelle est la fréquence de ces oscillations ?

Comparer cette valeur à celle de l'excitateur.



Activité 15

Nous avons réalisé des mesures afin de tracer la courbe de résonance, c'est-à-dire l'amplitude z des oscillations en fonction de la fréquence f imposée par l'excitateur.

Les mesures faites sont les suivantes :

f (en Hz)	z (en cm)
0,50	2,5
0,65	2,5
0,80	3,0
0,92	4,0
1	4,25
1,1	5,75
1,2	8
1,25	10
1,3	13
1,35	16
1,4	16,5
1,45	12,5
1,5	10
1,55	8
1,6	6
1,7	4
1,8	3
1,9	2
2,1	1,5

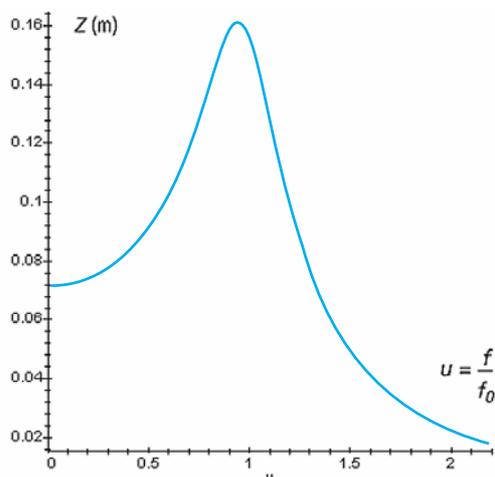
Tracer la courbe donnant l'amplitude z des oscillations en fonction de la fréquence f de l'excitateur.

- ❶ Comment varie l'amplitude des oscillations en fonction de la fréquence de l'excitateur ?
- ❷ Rechercher la fréquence pour laquelle l'amplitude est maximale ?
- ❸ La période propre T_0 du système ressort-solide est égale à $0,69\text{ s}$; comparer cette valeur à celle de la période de l'excitateur lorsque l'amplitude est maximale.

Lorsque l'amplitude est maximale, on dit qu'il y a résonance ; le système ressort-solide est un résonateur.

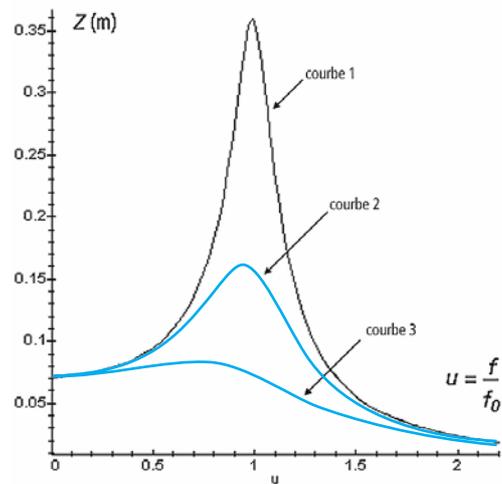
La résonance mécanique se produit lorsque la période de l'excitateur est voisine de la période propre du résonateur.

Soit f la fréquence de l'excitateur et f_0 la fréquence propre du résonateur ; si l'on pose $u = \frac{f}{f_0}$, on s'aperçoit que la résonance produit au voisinage de $u = 1$ (voir courbe ci-dessous).



② Influence de l'amortissement sur la résonance

Une augmentation de l'amortissement (de la courbe 1 à la courbe 3) provoque une diminution de l'amplitude des oscillations.



B Exemples de résonances mécaniques

Une automobile (telle que l'ancienne 2 CV de Citroën) et sa suspension constitue un résonateur ; les irrégularités de la route constitue l'excitateur.

En 1850, un pont d'Angers se mit à osciller au passage d'une troupe et se rompit.

En acoustique, on utilise le phénomène de résonance ; la caisse de résonance et l'air qu'elle contient constitue un oscillateur acoustique.

Résumé

Un pendule est constitué par un petit objet attaché au bout d'un fil, l'autre extrémité du fil est fixe. Lorsque le fil est rigide, de longueur constante, de masse négligeable par rapport à celle de la boule et lorsque les dimensions de la boule sont très faibles par rapport à la longueur du fil, le pendule est appelé pendule simple.

Pour des petites oscillations, la période propre des oscillations ne dépend pas de l'angle initial dont on écarte le pendule de sa position d'équilibre ; la période T est définie par : $T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}$ où g est l'intensité de la pesanteur en $m \cdot s^{-2}$, ℓ en m , T en s .

La force de rappel \vec{T} exercée par un ressort a pour caractéristiques :

- direction : celle de l'axe du ressort,
- sens : vers le ressort s'il est étiré,
- sa valeur est proportionnelle à l'allongement du ressort : $T = k|\Delta\ell| = k|\ell - \ell_0|$.

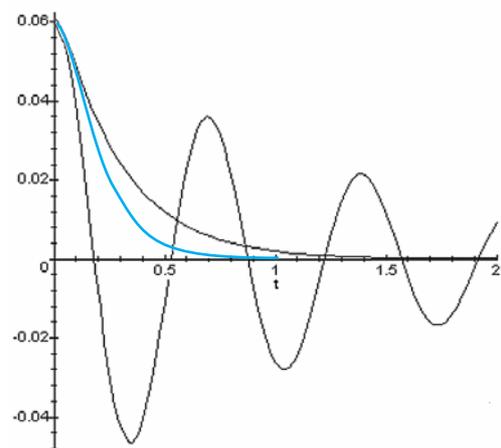
L'équation différentielle donnant l'élongation du ressort pour un système solide-ressort horizontal s'écrit $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0$; la solution de cette équation différentielle est de la forme :

$x = X_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$; X_m et φ sont déterminés par les conditions initiales.

La période propre du système solide-ressort horizontal est égale à : $T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$. La période propre des oscillations ne dépend pas de leur amplitude.

Dans le cas d'un amortissement faible la pseudo-période est voisine de la période propre.

Si les frottements augmentent et atteignent une valeur critique, le mobile accroché au ressort n'oscille plus mais regagne simplement sa position d'équilibre ; nous avons un régime critique. Si les frottements sont encore plus grands, nous avons un régime aperiodique.



Le phénomène de résonance mécanique se produit lorsque la période de l'excitateur est voisine de la période propre du résonateur.

Une augmentation de l'amortissement provoque une diminution de l'amplitude des oscillations.

Exercices

Exercice ❶ Galilée

Galilée écrivait à propos du pendule simple : « Si un pendule a une longueur neuf fois supérieure à celle d'un autre pendule, celui-ci effectuera trois oscillations pendant que celui-là en accomplira une seule. » Galilée avait-il raison ?

Exercice ❷ Pendule simple

Sur Terre, on souhaite réaliser un pendule simple qu'on puisse utiliser facilement pour mesurer des durées, la période des oscillations étant égale à deux secondes.

Déterminer les caractéristiques de ce pendule simple (masse, longueur du fil, ...).

Donnée : $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Exercice ❸ Pendule simple sur la Lune

Sur la Terre, on écarte un pendule simple de sa position d'équilibre et on le lâche ; le pendule effectue 10 oscillations en 10,7 secondes.

Quelle serait la durée de dix oscillations du même pendule sur la Lune ?

Données : sur la Terre : $g_T = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; sur la Lune : $g_L = 1,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Exercice ❹ Période d'un pendule simple

Nous avons vu que lorsqu'un pendule simple effectue des oscillations de faible amplitude, la période

T est reliée à la longueur ℓ du fil par : $T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}$.

Plusieurs mesures de la période T ont été effectuées pour des longueurs ℓ de fil différentes :

ℓ (m)	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75
T (s)	0,78	1,10	1,35	1,56	1,74
$\frac{T}{\sqrt{\ell}}$					

1 Sans utiliser la calculatrice, montrer que la période T et la longueur ℓ vérifient bien la formule donnée en choisissant deux couples de valeurs ; on pourra utiliser le fait que $\sqrt{4\ell} = 2\sqrt{\ell}$.

2 Compléter la 3^{ème} ligne du tableau ; que remarque-t-on ?

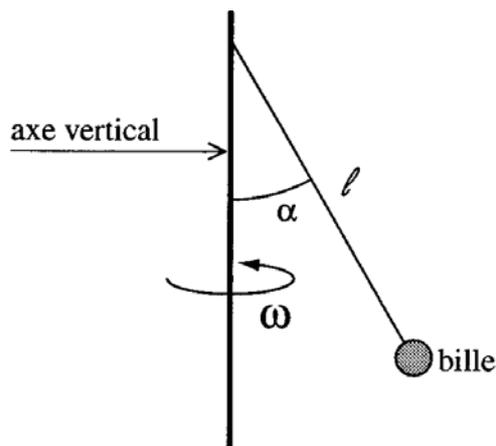
3 Cette expérience a-t-elle été faite sur la Terre ou sur la Lune ?

Données : sur la Lune : $g = 1,62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; sur la Terre : $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Exercice 5 Pendule en rotation uniforme

Une bille, de masse m , est suspendue à un fil inextensible, de longueur ℓ ; l'autre extrémité du fil est accrochée à un axe vertical qui tourne à vitesse angulaire constante ω ; le fil s'écarte alors d'un angle α de l'axe vertical.

Déterminer les caractéristiques du vecteur accélération \vec{a}_G du centre d'inertie de la bille (on donnera la valeur de \vec{a}_G en fonction de m , g et α).



Exercice 6 Constante de raideur

Considérons un ressort à spires non jointives ; le ressort a une constante de raideur k , une longueur à vide ℓ_0 ; sa longueur ℓ est mesurée en fonction de la valeur de la force \vec{F} exercée par le ressort sur différents objets suspendus.

Données : $\ell_0 = 12 \text{ cm}$.

F (N)	0,98	1,96	2,94	3,92	4,90
ℓ (cm)	16,0	20,1	23,9	28,0	32,1

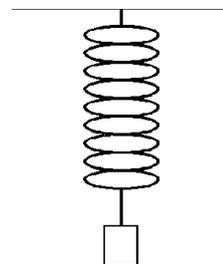
- 1 Représenter graphiquement la valeur F en fonction de $|\Delta\ell| = \ell - \ell_0$.
- 2 Déterminer la constante de raideur du ressort.
- 3 Déterminer la valeur de la force \vec{F} lorsque l'allongement du ressort est de 10 cm.

Exercice 7 Oscillateur vertical

À un ressort vertical accroché à un support, on suspend une masse m et on la fait osciller verticalement de part et d'autre de sa position de repos ; on obtient un phénomène périodique.

On mesure la période T des oscillations pour différentes valeurs de la masse m , le ressort étant écarté toujours de la même façon ; les mesures sont notées dans le tableau suivant.

m (g)	50	70	100	120	150	200
T (s)	0,66	0,78	0,94	1,02	1,14	1,32



- 1 La période T dépend-elle de la masse ? Qu'observe-t-on pour la période lorsque la masse est multipliée par 4 ?
- 2 La période T s'exprime par : $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ où k est une constante dépendant du ressort exprimée en $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$. Montrer que les mesures du tableau permettent de vérifier la formule. Calculer la constante k .
- 3 Sur la Lune où l'intensité de la pesanteur est égale à $1,62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, la période des oscillations serait-elle la même que sur Terre où l'intensité de la pesanteur est égale à $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$?
- 4 Quelle est la valeur de la masse qui permettrait d'avoir une période de 1 seconde ?

Exercice 8 Force exercée par un ressort

Considérons un cylindre de masse m suspendu à un ressort à spires non jointives ; le ressort a une constante de raideur k , une longueur à vide ℓ_0 et une longueur ℓ lorsque le cylindre y est accroché.

Données : $g = 9,8 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$; $m = 200 \text{ g}$; $k = 16 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$; $\ell_0 = 10 \text{ cm}$; $\ell = 22,3 \text{ cm}$.

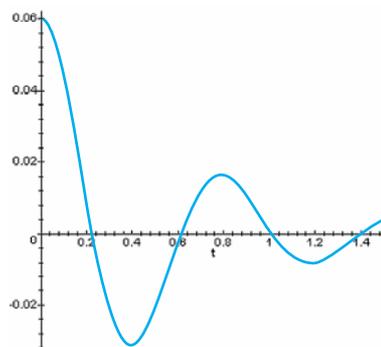
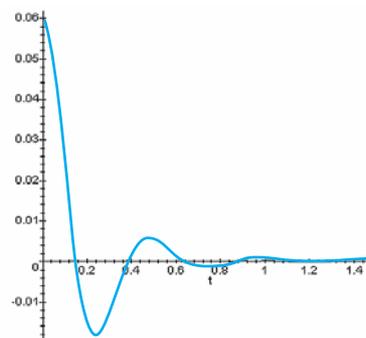
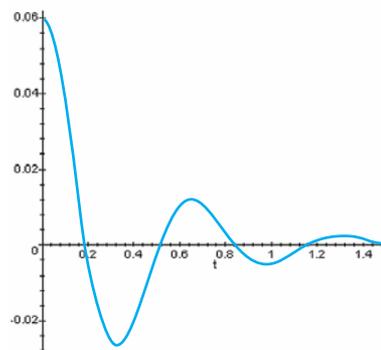
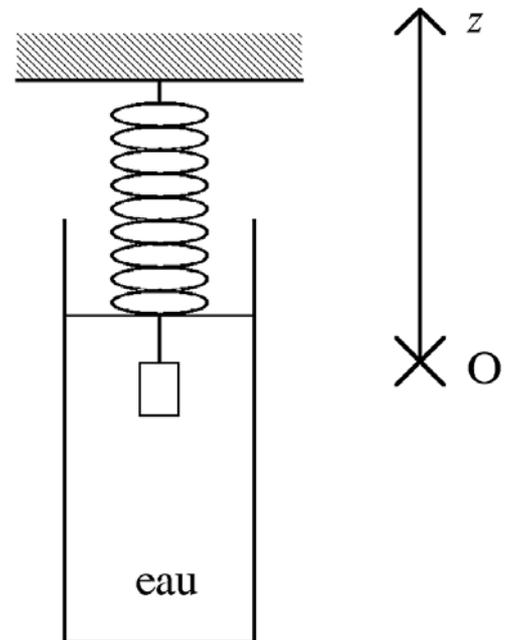
- ❶ Le fait de savoir que le ressort est à spires non jointives est-il important ?
- ❷ Donner les caractéristiques du vecteur force modélisant l'action du ressort sur le cylindre.
- ❸ Donner les caractéristiques du vecteur force représentant les actions réparties de la Terre sur l'objet.

Exercice 9 Influence de la masse suspendue au ressort

À un ressort vertical de constante de raideur k accroché à un support, on suspend des objets ayant la même forme mais de masses différentes (m_1 , m_2 et m_3) ; on les fait osciller verticalement dans de l'eau de part et d'autre de la position de repos (point O).

On enregistre les positions de l'objet ; on obtient les courbes suivantes représentant z en fonction du temps t .

Données : $k = 20 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$; $m_1 = 100 \text{ g}$, $m_2 = 200 \text{ g}$ et $m_3 = 300 \text{ g}$.

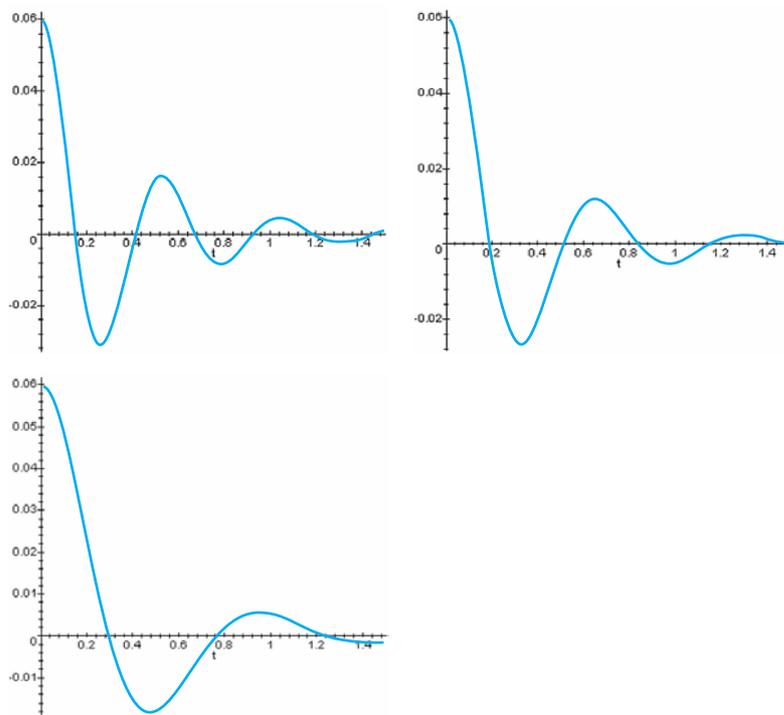


À quelles masses correspondent ces courbes ? Justifier votre réponse.

Exercice 10 Influence de la constante de raideur

On reprend l'exercice précédent mais on garde la même masse mais avec des ressorts de constante de raideur différentes.

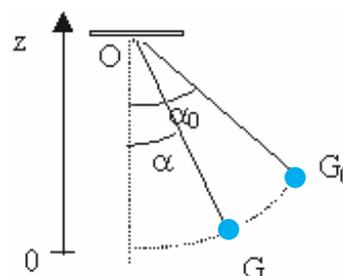
Données : $m = 200 \text{ g}$; $k_1 = 20 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, $k_2 = 10 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ et $k_3 = 30 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$.



À quelles constantes de raideur correspondent ces courbes ? Justifier votre réponse.

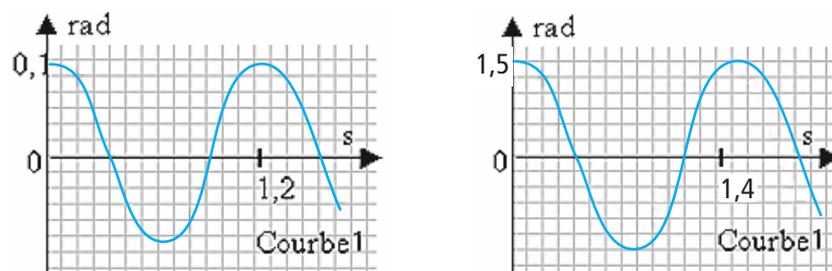
Exercice 11 Étude d'un pendule

On étudie les oscillations d'un pendule. L'objectif est de chercher dans quelles conditions ce pendule peut être assimilé à un oscillateur harmonique. Le pendule est constitué d'un corps de petites dimensions, de masse m , suspendu à un fil de longueur ℓ . Le pendule est écarté d'un angle α_0 de sa position d'équilibre et lâché sans vitesse initiale.



1 Étude expérimentale

Un dispositif approprié a permis d'enregistrer les courbes 1 et 2.



Déterminer graphiquement dans chaque cas la période et la valeur de l'angle α_0 .

② Étude théorique

Représenter sur un schéma les forces s'exerçant sur la petite boule fixée au fil.

L'équation différentielle du pendule s'écrit : $\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{g}{\ell} \sin \alpha = 0$.

L'équation différentielle d'un oscillateur harmonique s'écrit : $\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{g}{\ell} \alpha = 0$.

Quelle approximation doit-on faire pour assimiler le pendule expérimental à un oscillateur harmonique ?

Comparer les valeurs de α_0 en radian et $\sin \alpha_0$ pour les deux expériences précédentes. Dans quelle expérience le pendule peut-il être assimilé, de façon satisfaisante, à un oscillateur harmonique ? Justifier.

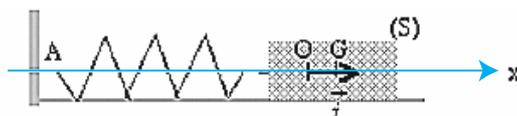
Exercice ⑩ Mesures d'une constante de raideur

① Un ressort de longueur ℓ_0 à vide est accroché par une extrémité à une potence. À l'autre extrémité est suspendu un solide S de masse m. L'ensemble est vertical et la longueur du ressort devient ℓ .

Étudier l'équilibre de S et exprimer k en fonction des paramètres adéquats.

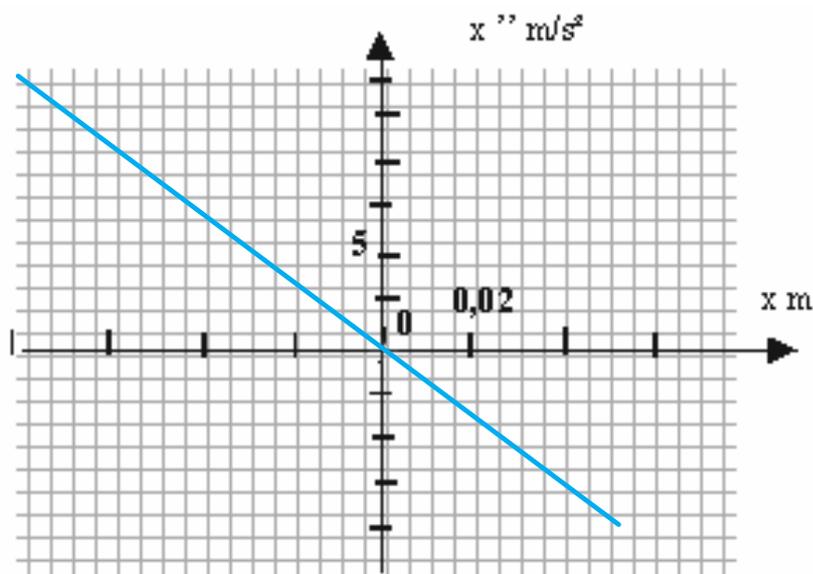
Calculer k si $m = 100 \text{ g}$, $\ell_0 = 400 \text{ mm}$ et $\ell = 448 \text{ mm}$.

② Le ressort et S sont placés sur un banc à coussin d'air horizontal. L'extrémité libre est accrochée à un point fixe et les frottements seront considérés comme négligeables. Au repos le centre d'inertie de S est en O, pris comme origine des abscisses sur l'axe horizontal $x'x$. On écarte G de sa position d'équilibre et on lâche S.



a) Faire l'inventaire des forces s'exerçant sur S dans une position quelconque de G lors de son mouvement.

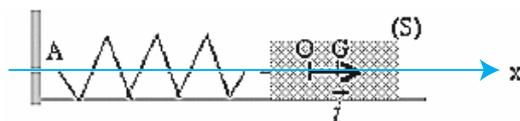
b) On pose $OG = x$; montrer que l'équation différentielle du mouvement peut s'écrire : $\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m} x = 0$. À l'aide du graphe ci-dessous déterminer la valeur de k.



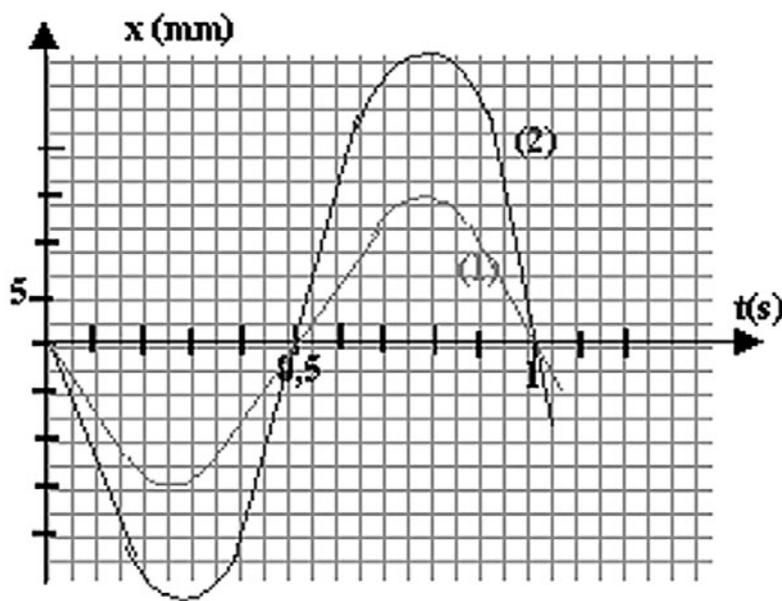
c) Vérifier que la solution de l'équation différentielle précédente est de la forme : $x = X_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$; en déduire l'expression de la période et la calculer.

Exercice 13 Étude expérimentale d'un pendule élastique

Sur un banc à coussin d'air horizontal, un palet de masse $m = 45 \text{ g}$ est accroché à un ressort de raideur k ; l'autre extrémité du ressort est fixe. La masse du ressort est négligée. La position du centre d'inertie est repérée par son abscisse x mesurée à partir de la position d'équilibre (à $x = 0$ le ressort n'est ni allongé ni comprimé). Le palet est écarté de sa position d'équilibre avant d'être lâché.



On réalise deux enregistrements avec le même ressort et le même palet.



1 On propose trois expressions de la période T de l'oscillateur ; k s'exprime en $\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$, X_m est l'amplitude des oscillations, g est la valeur du champ de pesanteur en $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{k}{m}} ; \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} ; \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{X_m}{g}}.$$

Donner l'expression de T qui n'est pas compatible avec l'analyse dimensionnelle.

Donner l'expression de T qui n'est pas compatible avec les graphes proposés.

2 Déterminer la constante de raideur du ressort.

Exercice 14 Suspension d'une automobile

La suspension d'un véhicule permet d'atténuer les vibrations verticales qui nuisent au confort et à la sécurité des passagers, par exemple lors du passage du véhicule dans un trou sur une route.

Elle est constituée au niveau de chaque roue d'un ressort et d'un amortisseur (voir figure 1). On note G le centre d'inertie du véhicule. Lorsqu'on écarte le véhicule de sa position d'équilibre GO et qu'on le lâche, il oscille autour de cette position. L'amplitude des oscillations décroît suivant le degré d'amortissement de la suspension. L'ensemble du véhicule est équivalent à un oscillateur mécanique unique vertical amorti de masse m , de raideur k .

On étudie le mouvement du centre d'inertie G seulement suivant la verticale. On repère son ordonnée y sur un axe Oy orienté vers le haut. La position du centre d'inertie du système à l'équilibre GO (ressorts comprimés) est prise pour origine O de l'axe.

Données :

Masse : $m = 1,5 \times 10^3 \text{ kg}$; constante de raideur du ressort équivalent $k = 6,0 \cdot 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$.

La force de frottement qui s'exerce sur la masse m est opposée à la vitesse du point G suivant la verticale, on peut l'écrire : $\vec{F} = -h v_y \vec{j}$ où v_y est la composante verticale de la vitesse du point G par rapport à l'axe de la roue et h une constante positive appelée coefficient d'amortissement ou de frottement.

On s'intéresse par la suite à l'influence de ce coefficient d'amortissement sur la qualité de la suspension.

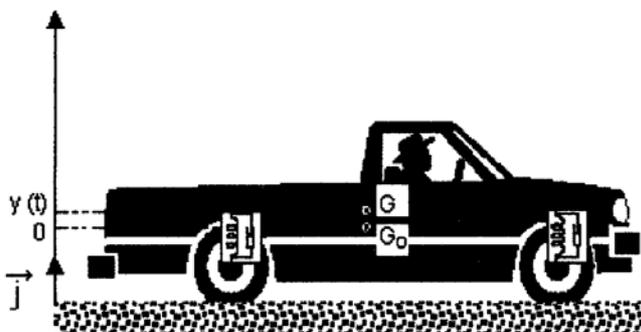


figure 1

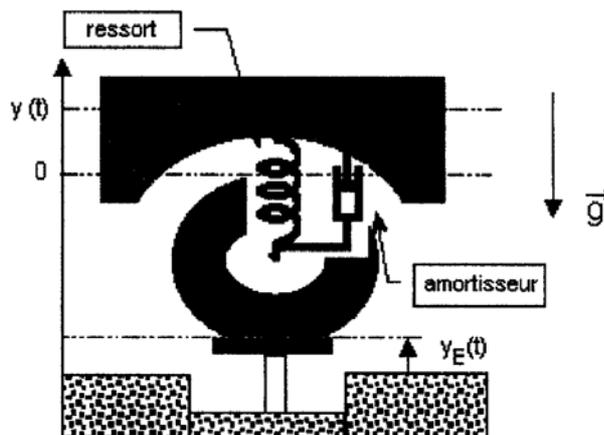
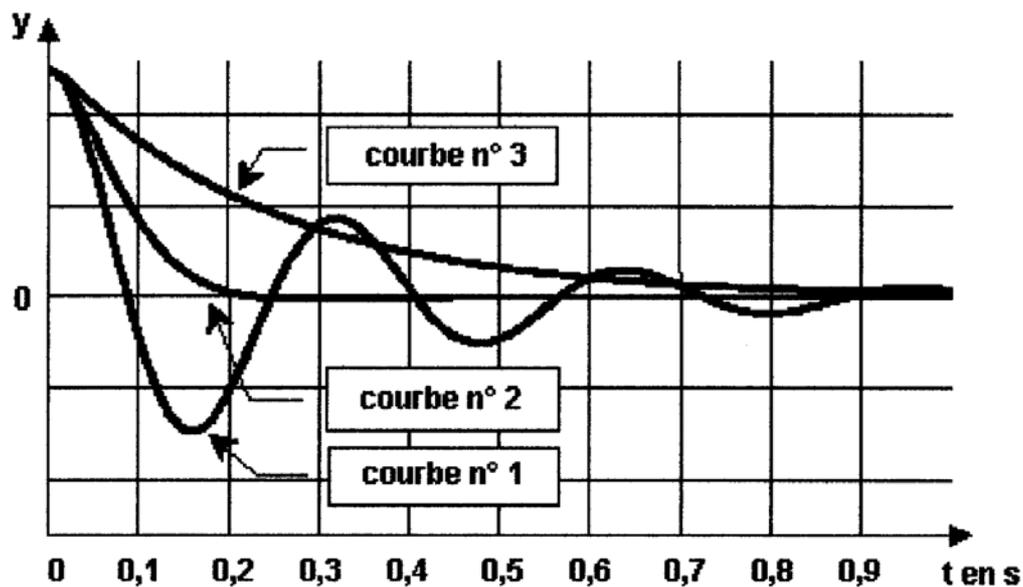


figure 2

● Oscillations libres de la suspension

Document 1 : oscillations libres de la suspension



Courbe n° 1 : associée au coefficient d'amortissement h_1

Courbe n° 2 : associée au coefficient d'amortissement h_2

Courbe n° 3 : associée au coefficient d'amortissement h_3

1 Le document 1 donne trois courbes représentant $y = g(t)$ pour trois véhicules dont seules les valeurs du coefficient d'amortissement sont différentes :

Courbe n° 1	Courbe n° 2	Courbe n° 3
$h_1 = 1,5 \cdot 10^4 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$	$h_2 = 5,0 \cdot 10^4 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$	$h_3 = 1,5 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Expliquer pourquoi les courbes n° 1 et n° 3 correspondent respectivement aux coefficients d'amortissement h_1 et h_3 .

2 L'une des courbes du document 1 est une sinusoïde amortie dont on définit la pseudo-période comme étant la durée entre deux maxima consécutifs. Déterminer graphiquement la valeur de cette pseudo-période T .

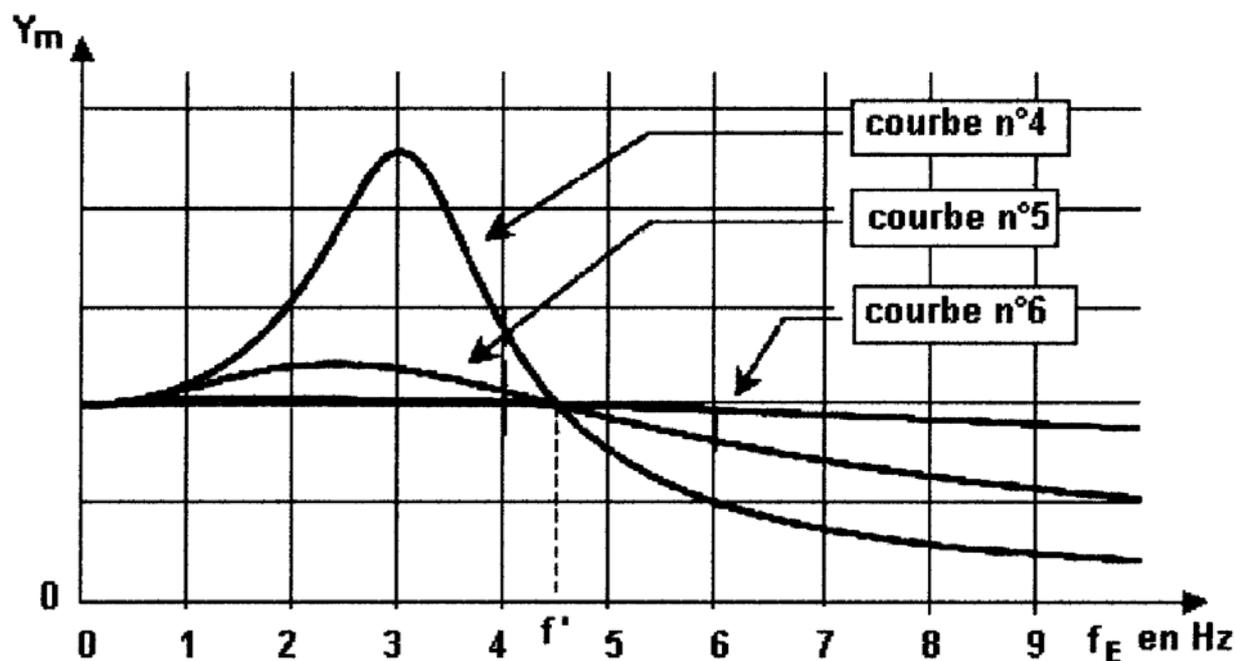
3 Le régime critique est le meilleur pour le confort et la sécurité des passagers. Quelle valeur du coefficient d'amortissement convient le mieux parmi les trois valeurs proposées ?

2 Test des amortisseurs, oscillations forcées

Pour tester chacun des amortisseurs, on soumet les roues à une même excitation sinusoïdale produite par un support placé sous chaque roue (figure 2). L'amplitude Y_m des oscillations du centre d'inertie G du véhicule dépend alors de deux facteurs : l'amplitude Y_E et la fréquence f_E de l'excitation sinusoïdale.

La résolution des questions suivantes ne demande aucune mise en équation. On admettra que le comportement qualitatif du système s'apparente à celui d'un oscillateur amorti soumis à une force excitatrice sinusoïdale.

Document 2 : oscillations forcées de la suspension



Courbe n° 4 : associée au coefficient d'amortissement h_1

Courbe n° 5 : associée au coefficient d'amortissement h_2

Courbe n° 6 : associée au coefficient d'amortissement h_3

1 L'amplitude Y_E de l'excitation sinusoïdale est maintenue constante.

Le document 2 donne les courbes représentant $Y_m = g(f_E)$ pour les trois valeurs du coefficient d'amortissement du paragraphe 1.1.

a) Pourquoi est-il important de préciser que l'amplitude Y_E de l'excitation est maintenue constante ?

b) Que peut-on dire de l'amplitude Y_m à la résonance ?

c) Pour le véhicule équipé de l'amortisseur de coefficient le plus faible, déterminer graphiquement la fréquence de résonance f_r . Comparer sa valeur à la fréquence propre $T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ de l'oscillateur mécanique {masse, ressort}.

d) Préciser à l'aide des courbes du document 2 si la fréquence de résonance est fonction du coefficient d'amortissement.

2 À la fréquence excitatrice $f'' = 4,5$ Hz, l'amplitude des oscillations Y_m est la même pour les trois oscillateurs.

Quel amortisseur faut-il choisir pour équiper le véhicule sachant que plus l'amplitude des oscillations est faible, meilleure est la qualité des amortisseurs :

* pour les fréquences excitatrices f_E telles que $f_E < f''$?

* pour des fréquences excitatrices $f_E > f''$?

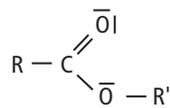
Quel amortisseur donne le meilleur compromis quelle que soit la fréquence excitatrice? (Justifier chaque réponse).

Chimie

Objectifs

- ▶ Reconnaître dans la formule d'une espèce chimique organique les groupes caractéristiques :
 $-OH$, $-CO_2H$, $-CO_2R$, $-CO-O-CO-$.
- ▶ Écrire l'équation des réactions d'estérification et d'hydrolyse.
- ▶ À partir de la formule semidéveloppée d'un ester, retrouver les formules de l'acide carboxylique et de l'alcool correspondants.
- ▶ Savoir nommer les esters comportant cinq atomes de carbone au maximum.
- ▶ Savoir que les réactions d'estérification et d'hydrolyse sont inverses l'une de l'autre et que les transformations associées à ces réactions sont lentes.
- ▶ Savoir qu'un catalyseur est une espèce qui augmente la vitesse d'une réaction chimique sans figurer dans l'équation de la réaction et sans modifier l'état d'équilibre du système.
- ▶ Savoir que l'excès de l'un des réactifs et/ou l'élimination de l'un des produits déplace l'état d'équilibre du système dans le sens direct.

Les esters constituent une famille de composés organiques qui possèdent les mêmes propriétés chimiques et, par conséquent, le même groupe fonctionnel :



R et R' sont deux radicaux quelconques (identiques ou différents).

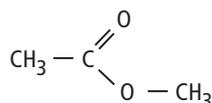
La formule d'un ester dérive de celle d'un acide carboxylique RCOOH par le remplacement de l'atome d'hydrogène du groupe carboxyle par un radical R'.

On dit alors que les esters sont des dérivés d'acide. Ils entrent dans la composition de certains parfums ainsi que dans celle des huiles et des graisses.

Le nom de l'ester s'obtient à partir du nom de l'acide carboxylique correspondant ainsi que de celui du groupe R'.

À partir du nom de l'acide, on supprime le mot « acide » et on remplace la terminaison « oïque » par « oate » et on ajoute « de » suivi du nom du radical R'.

Exemple :



dérivé de l'acide acétique CH_3COOH et R' : radical méthyle donc : éthanoate de méthyle ou : acétate de méthyle.

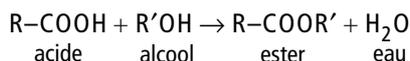
Activité 1 Nommer les esters :



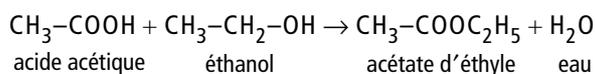
A Définition

La réaction d'estérification est la réaction de synthèse d'un ester à partir d'un acide carboxylique et d'un alcool.

La transformation correspondante donne naissance aussi à de l'eau, selon l'équation-bilan :



Exemple :



Activité 2 Écrire la formule et nommer l'ester obtenu par réaction entre :

- * l'acide méthanoïque et l'éthanol,
- * l'acide propanoïque et le butan-1-ol.

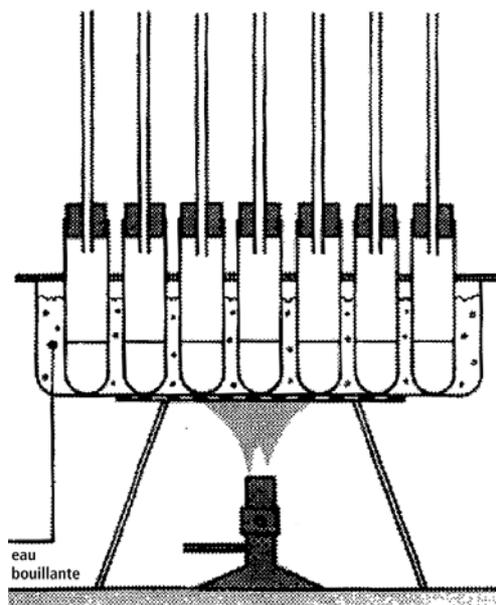
Activité 3 Reconnaître, dans chaque formule d'ester suivante, l'acide et l'alcool correspondant :

- * $\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$ $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{COOC}_2\text{H}_5$

B Caractéristiques de la réaction

L'étude se fera à partir de l'acide éthanoïque et de l'éthanol.

- ▶ Mettre gants et lunettes de protection.
- ▶ Verser la solution d'hydroxyde de sodium dans la burette.
- ▶ Dans un erlenmeyer sec, introduire 25,6 mL d'acide acétique pur, puis 2,2 mL d'acide sulfurique concentré, et enfin, 26,1 mL d'éthanol absolu.
- ▶ Boucher l'erlenmeyer, agiter le mélange afin d'homogénéiser et le répartir dans 11 tubes à essais, à raison de 4,0 mL par tube.
- ▶ Surmonter 10 tubes à essais d'un réfrigérant à air et les placer dans un bûcher de 500 mL à moitié rempli d'eau à 100 °C (eau bouillante). Déclencher le chronomètre au moment de l'immersion partielle des tubes à essais.
- ▶ Verser le contenu du 11^{ème} tube à essais dans un bûcher contenant environ 50 mL d'eau glacée. Rincer le tube à essais et ajoute l'eau de rinçage dans le bûcher.
- ▶ Ajouter quelques gouttes de phénolphtaléine et dose l'acide du mélange à l'aide d'une solution titrée d'hydroxyde de sodium à 2,00 mol · L⁻¹.



- ▶ Refaire de même à chaque date prévue dans le tableau ci-après, en prélevant un tube à essais de l'eau bouillante.
- ▶ Enfin, dans un erlenmeyer, réaliser le mélange n° 12 suivant : 51,7 mL d'eau et 2,2 mL d'acide sulfurique concentré. Boucher, agiter et prélever 4,0 mL du mélange. Doser ce mélange par la solution d'hydroxyde de sodium titrée (attention : indicateur coloré : bleu de bromothymol).

On obtient les résultats suivants :

Dosage du tube n° 9 : $V_{b,eq} = 3,0$ mL

Date (min)	t	Volume de soude à l'équivalence V_{eq} (mL)	Volume de soude ayant réagi avec l'acide éthanóique (mL)	Quantité d'acide restant n_{acide} (10^{-3} mol)	Quantité d'ester formé n_{ester} (10^{-3} mol)
0		19,9			
2		17,0			
5		13,7			
8		11,5			
10		11,0			
15		9,9			
20		9,25			
30		8,9			
35		8,75			
45		8,7			

Activité 4

a) Écrire l'équation de la réaction associée à la transformation subie par le système.

Écrire l'équation de la réaction de dosage de l'acide éthanóique restant dans le mélange.

Quelle est la relation entre quantités de matière d'acide éthanóique et de base à l'équivalence ?

b) Calculer les quantités initiales (en mol) de chacun des réactifs (acide acétique et éthanol) dans chaque tube à essais et vérifier qu'ils sont bien dans les proportions stœchiométriques

	Acide acétique	Éthanol	Acétate d'éthyle
Densité	1,05	0,79	0,91

À quoi sert le dosage du 12ème tube à essais ?

c) À partir de la valeur des volumes V_{eq} et V , calculer les quantités de matière (en mol) d'ester formé et d'acide éthanóique restant à la date t considérée ; remplir alors les dernières colonnes du tableau (attention ! tenir compte de la présence d'acide sulfurique)).

d) Quelle est la relation entre l'avancement $X(t)$ de la réaction et la quantité d'ester formé $n_{ester}(t)$?

Calculer la valeur de l'avancement maximal X_{max} de la réaction.

e) Tracer le graphe donnant l'évolution de l'avancement X en fonction du temps : $X = f(t)$.

f) Justifier alors le fait que la transformation associée à la réaction d'estérification est une transformation lente.

Quel est le rôle de l'acide sulfurique ?

Pourquoi place-t-on les mélanges à température élevée ?

g) Calculer la valeur du taux d'avancement t de la réaction, à chaque date t du tableau.

Vers quelle valeur limite tend t ? Calculer la valeur du rendement de la synthèse de l'ester :

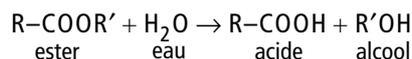
$$r = \frac{\text{quantité de matière d'ester formé à l'état final} : n_{ester\ final}}{\text{quantité de matière d'ester formé si la réaction est totale} : n_{ester\ maximal}}$$

Comparer les valeurs de τ_{limite} et r .

La transformation associée à la réaction d'estérification est-elle une transformation totale ?

A Définition

La réaction d'hydrolyse d'un ester est la réaction inverse de la réaction d'estérification. Un ester, hydrolysé par l'eau (hydro eau, lyse coupure) donne naissance à un acide carboxylique et à un alcool selon l'équation de réaction :



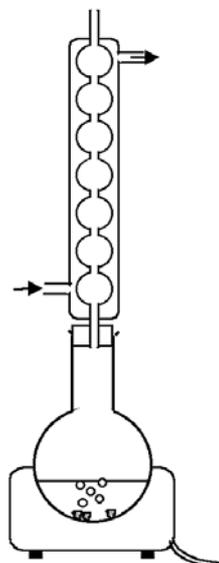
B Caractéristiques de la réaction

L'étude se fait à partir de l'éthanoate d'éthyle et de l'eau.

L'ester et l'eau sont peu miscibles : on ne peut pas suivre l'évolution de la composition du système comme précédemment.

Aussi, on n'étudie ici la composition du système que dans son état final après 45 minutes.

- ▶ Dans un ballon sec, introduire 7,7 mL d'éthanoate d'éthyle, puis 0,4 mL d'acide sulfurique concentré, et enfin, 1,5 mL d'eau.
- ▶ Ajouter un barreau aimanté, surmonter l'erlenmeyer d'un réfrigérant à eau et fixer le tout dans un bécher contenant de l'eau bouillante tout en agitant de temps en temps.



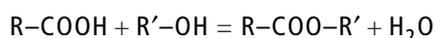
- ▶ Au bout de 45 minutes, verser le contenu de l'erlenmeyer dans un bécher contenant environ 50 mL d'eau glacée. Rincer l'erlenmeyer et ajouter l'eau de rinçage dans le bécher.
- ▶ Ajouter quelques gouttes de phénolphaléine et doser l'acide du mélange à l'aide d'une solution titrée d'hydroxyde de sodium à $2,00 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. On trouve alors $V_{b,eq} = 19,6 \text{ mL}$.

- Activité 5**
- a) Calculer les quantités initiales (en mol) de chacun des réactifs (acétate d'éthyle et eau) et vérifier qu'ils sont bien dans les proportions stœchiométriques (voir tableau de l'activité 4).
 - b) Calculer la quantité de matière d'ester restant à $t = 45 \text{ min}$ (on admet que le volume V' de soude nécessaire au dosage de l'acide sulfurique présent dans le mélange est égal à $2,4 \times V$).
 - c) En déduire la valeur du taux d'avancement final t à $t = 45 \text{ min}$.
 - d) Comparer l'état final du système (quantité de chaque espèce présente) avec l'état final du système obtenu par la réaction d'estérification.

Activité 6 Comparer les valeurs des taux d'avancement final de chacune des 2 réactions précédentes (estérification et hydrolyse) à la même date : $t = 45 \text{ min}$ à partir de mélanges équimolaires de réactif.

Cet état final unique est appelé **état d'équilibre** chimique obtenu grâce à 2 transformations inverses l'une de l'autre et qui ont lieu simultanément, dès que les 4 corps (acide, alcool, ester et eau) sont en présence.

La transformation associée à la réaction d'estérification est réversible et la réaction est symbolisée par un signe « égal » :



De plus, ces 2 transformations ne sont pas totales ; on dit qu'elles sont **limitées**.

Avant que l'équilibre ne soit atteint, l'une des deux transformations l'emporte sur l'autre (son avancement est supérieur à l'avancement de l'autre) et provoque ainsi la diminution de la concentration de ses réactifs.

À l'état d'équilibre, tout se passe comme si les transformations s'arrêtaient. En réalité, elles se poursuivent toujours mais se compensent exactement.

L'arrêt des transformations n'est donc qu'apparent. L'équilibre chimique est appelé, pour cette raison, **équilibre dynamique**.

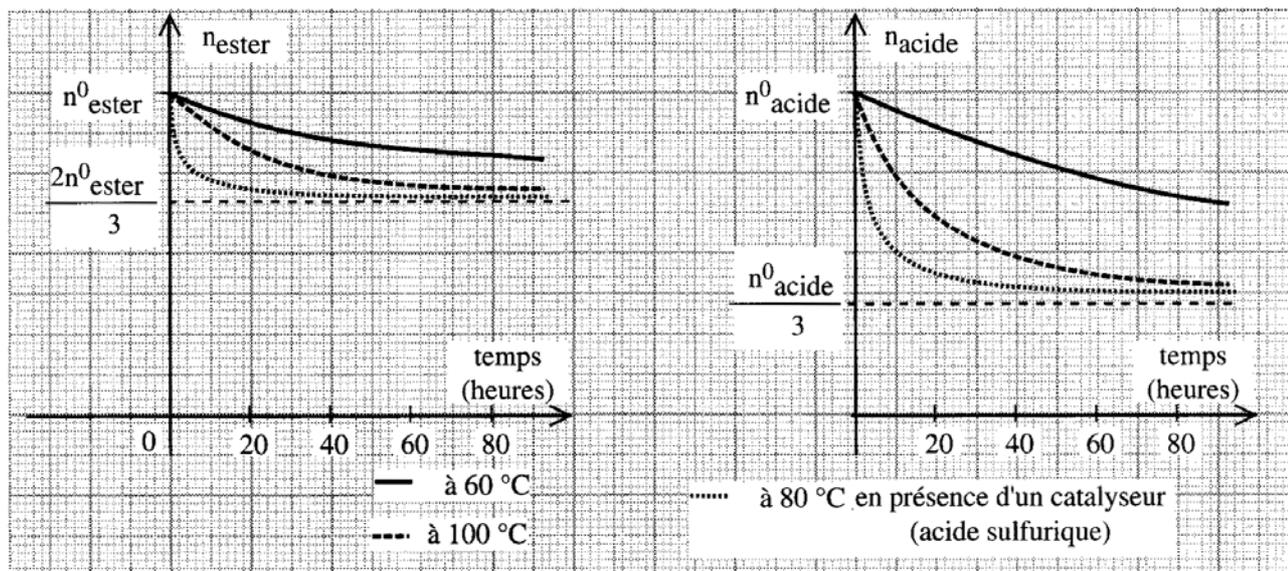
Il faut bien comprendre que les transformations (estérification et hydrolyse) ne se compensent qu'à l'équilibre.

Remarque

Si le nombre d'habitants d'une ville est stable pendant une période donnée, c'est que le nombre de naissances est égal au nombre de décès, et non parce qu'il n'y a eu ni naissances, ni décès. On retrouve ici la notion d'équilibre dynamique.

A Rôle de la température

Pour mettre en évidence le rôle de la température, il faut superposer, sur un même graphique, les courbes d'estérification et d'hydrolyse (pour les mêmes conditions initiales) à différentes températures.



Activité 7 Quelle est l'influence de la température, sur :

- * chaque réaction ?
- * l'équilibre chimique ?

B Rôle d'un catalyseur

Les réactions d'estérification et d'hydrolyse d'un ester sont toutes deux catalysées par l'ion hydronium ou oxonium (H_3O^+). Pour cela, il est possible d'ajouter, dans le mélange réactionnel, une faible quantité d'acide sulfurique H_2SO_4 ou, mieux, acide paratoluène sulfonique : $\text{H}_3\text{C}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{SO}_3\text{H}$. Comparons les courbes obtenues avec et sans catalyseur (voir courbes précédentes).

Activité 8 Quelle est l'influence d'un catalyseur sur :

- * la réaction ?
- * l'équilibre chimique ?

A Influence des proportions initiales des réactifs sur l'état d'équilibre

En revenant sur l'exemple de la réaction d'estérification, il est possible de partir de réactifs en proportions non stœchiométriques.

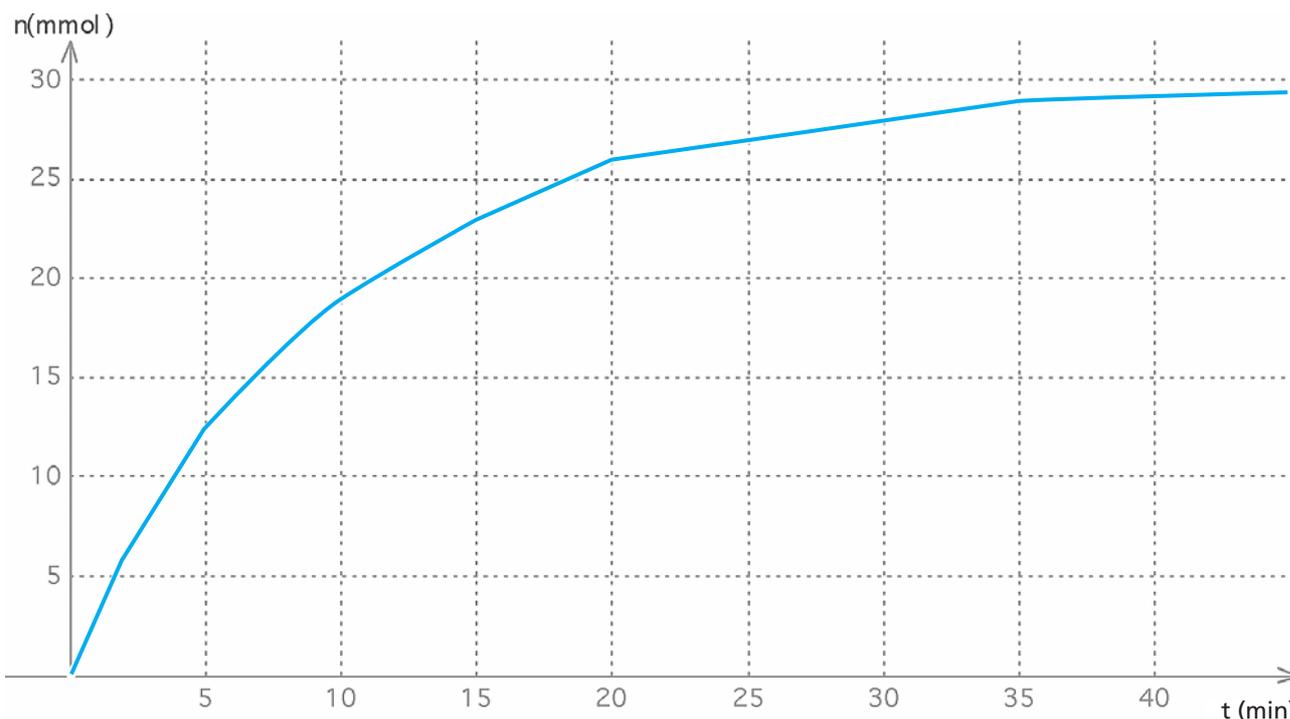
Pour cela, il suffit de modifier la quantité initiale d'alcool, par exemple.

Le protocole expérimental est le même que précédemment (tubes à essais dans l'eau bouillante), mais avec les volumes de réactifs suivants :

► Dans un erlenmeyer sec, introduire 25,6 mL d'acide acétique pur, puis 2,2 mL d'acide sulfurique concentré, et enfin, 37,2 mL d'éthanol absolu.

Activité 9 Quelle quantité initiale (en mol) d'alcool utilise-t-on ici ?

Après dosage des échantillons de mélange réactionnel, on peut calculer l'avancement X de la réaction aux différents instants considérés et alors tracer le graphe exprimant les variations de l'avancement X de la réaction en fonction du temps t , soit : $X = f(t)$:



Activité 10 Comparer ce graphe avec celui obtenu dans les proportions équimolaires de réactifs. Dans ces conditions initiales, la transformation est-elle :

- Plus rapide ?
- De taux d'avancement plus important ?

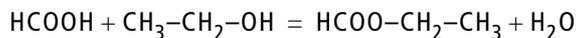
Le taux d'avancement devient plus important, car le fait d'augmenter la concentration d'un des réactifs (acide ou alcool) entraîne une diminution du quotient de réaction $Q_r = \frac{[\text{ester}]}{[\text{acide}] \cdot [\text{alcool}]}$ ce qui le met dans une situation où la valeur de Q_r est inférieure à la constante d'équilibre K . Le système évolue donc spontanément dans le sens direct.

B Élimination d'un produit

Lors de la réaction d'estérification, si la température d'ébullition de l'ester est nettement inférieure à celles des autres espèces chimiques du système, il est possible de l'extraire du mélange par distillation fractionnée.

C'est le cas du méthanoate d'éthyle (ou formiate d'éthyle) qui est un ester à odeur de rhum.

L'équation de la réaction de synthèse de cet ester s'écrit :



Sa température d'ébullition (54 °C) est inférieure à celles de tous les autres constituants du mélange réactionnel ; en effet, l'eau bout à 100 °C, l'acide méthanoïque à 101 °C et l'éthanol à 78,5 °C.

Activité 11 *Quel montage expérimental adopter pour extraire l'ester au fur et à mesure de sa formation ?*

Que faut-il particulièrement surveiller, lors de la synthèse ? Justifier la réponse.

On place dans le ballon 20 mL d'acide méthanoïque pur, 30 mL d'éthanol (alcool à 90°), de l'acide paratoluènesulfonique ainsi que quelques grains de pierre ponce.

L'acide paratoluène sulfonique remplace avantageusement l'acide sulfurique (manipulation moins dangereuse).

Après distillation, on recueille une masse $m = 34,3$ g d'éthanoate d'éthyle.

- Activité 12**
- 1 *Calculer la valeur du rendement de cette synthèse.*
 - 2 *En déduire l'influence de l'élimination d'un produit sur l'état d'équilibre.*
 - 3 *Comme précédemment, justifier le sens spontané de l'évolution du système par l'évolution du quotient de réaction.*

Données :

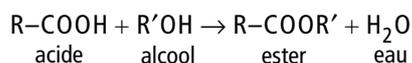
	Acide formique	Éthanol
Densité	1,19	0,79

Masses molaires (en $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$) : C : 12 ; O : 16 ; H : 1.

Résumé

La réaction d'estérification est la réaction de synthèse d'un ester à partir d'un acide carboxylique et d'un alcool.

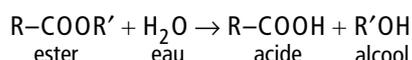
La transformation correspondante donne naissance aussi à de l'eau, selon l'équation :



La transformation associée à cette réaction est lente et limitée (non totale).

La réaction d'hydrolyse d'un ester est la réaction inverse de la réaction d'estérification.

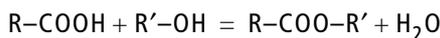
Un ester, hydrolysé par l'eau (hydro eau, lyse coupure) donne naissance à un acide carboxylique et à un alcool selon l'équation de réaction :



La transformation associée à cette réaction est lente et limitée (non totale).

À partir d'un mélange acide + alcool ou ester + eau, la composition du système à l'état final est unique. Cet état final est appelé **état d'équilibre** chimique.

La transformation associée à la réaction d'estérification est réversible et la réaction est symbolisée par un signe « égal » :



On peut contrôler (modifier) la vitesse d'une réaction par 2 facteurs (appelés facteurs cinétiques) : la température et un catalyseur (substance chimique) : l'un comme l'autre augmente la vitesse de la réaction sans modifier l'état d'équilibre du système.

Enfin, on peut **contrôler** (modifier) l'**état d'équilibre** d'un système :

- ▶ En plaçant un réactif en excès.
- ▶ En éliminant un produit au fur et à mesure de sa formation.

Dans un cas comme dans l'autre, cela a pour effet de déplacer l'état d'équilibre du système dans le sens direct.

Exercices d'applications

Exercice ❶ Hydrolyse d'un ester

L'hydrolyse d'un ester (E) conduit à la formation de deux composés (A) et (B) que l'on se propose d'identifier. (A) et (B) sont isolés et traités séparément :

- ❶ (A) est soluble dans l'eau ; la solution aqueuse obtenue conduit le courant électrique et jaunit le bleu de bromothymol.
 - ❷ (B) subit une oxydation ménagée. Le produit (D) obtenu par oxydation donne un précipité jaune avec la dinitrophénylhydrazine (DNPH) et un précipité rouge avec la liqueur de Fehling.
- Déduire de ces expériences les fonctions chimiques de (A), (B) et (D).

Exercice ❷ Synthèse d'un arôme à odeur de banane

	Masse molaire ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)	Masse volumique ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
Butan-1-ol	74	0,81
Ester E	116	0,88

On veut préparer un ester E à odeur de banane en faisant réagir sur du butan-1-ol, de l'acide éthanóique.

- ❶ En utilisant les formules semi-développées, écrire l'équation de la réaction associée à la transformation subie par le système.

Nommer l'ester formé.

On fait réagir 0,100 mol d'acide éthanóique avec 0,100 mol de butan-1-ol.

- ❷ Calculer le volume de butan-1-ol utilisé.

On obtient 8,6 mL d'ester E.

- ❸ Calculer le rendement de cette préparation, c'est-à-dire le rapport de la quantité de matière d'ester produit à la quantité de matière d'ester attendue théoriquement.

Exercices type bac

Exercice ❸ Estérification

I. On étudie la réaction entre l'acide méthanoïque et le méthanol. Dans plusieurs ampoules on mélange 2,3 g d'acide et 1,6 g d'alcool. On scelle ensuite les ampoules et on les place dans une étuve à 50 °C.

Au bout de 24 heures on constate que la masse d'acide que l'on peut doser reste constante et vaut 0,76 g.

- ❶ Écrire l'équation de la réaction en utilisant les formules développées.
- ❷ Quelles sont ses caractéristiques ?
- ❸ Quel est le pourcentage d'alcool estérifié ?

II. On veut maintenant préparer du méthanoate de méthyle.

Proposer un montage qui permettra, avec les mêmes réactifs que précédemment, d'obtenir un rendement plus important et de séparer l'ester formé (on fera un schéma détaillé, et on expliquera son principe et pour quelle raison le rendement est amélioré).

Données	Température d'ébullition (°C) à la pression atmosphérique
Acide méthanoïque	65
Méthanol	100,7
Méthanoate de méthyle	31,5

Masses molaires atomiques ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$) : C : 12 ; O : 16 ; H : 1.

Exercice 4 Les travaux de Marcellin Berthelot

Marcellin Berthelot (1827-1907), chimiste français spécialisé dans la synthèse organique, réalisa des réactions d'estérification et d'hydrolyse d'ester selon le protocole expérimental suivant. Un mélange équimoléculaire de 0,20 mol d'acide éthanoïque et de 0,20 mol d'éthanol auquel est ajouté de l'acide sulfurique concentré est réalisé à l'instant $t = 0$ en mélangeant 11,4 mL d'acide, 11,6 mL d'alcool et 1 mL d'acide sulfurique. Après homogénéisation, 4 mL sont versés dans cinq tubes à essais placés au bain-marie à 45 °C. À l'instant $t = t_1$, on sort le tube n° 1 du bain-marie, on verse son contenu dans un bécher contenant de l'eau glacée et l'on procède de même avec les autres tubes aux instants t_2 . On se propose de mesurer l'avancement X de la réaction.

1 a) Quelles précautions doit-on prendre pour réaliser le mélange acide acétique-éthanol-acide sulfurique ?

b) Pourquoi place-t-on les tubes au bain-marie ?

c) Pourquoi verse-t-on le contenu du tube n° 1 dans de l'eau glacée ? Comment appelle-t-on cette opération ? N'y a-t-il pas un inconvénient à diluer ainsi le mélange pour le dosage ?

d) Écrire l'équation de la réaction chimique qui a lieu. Quel est le rôle de l'acide sulfurique ?

2 L'éthanol a une densité de 0,81 et un degré de pureté de 97,9 %. Quel volume doit-on prélever si on souhaite avoir 0,2 mol d'alcool ? Avec quelle verrerie prélèvera-t-on ce volume ?

3 On se propose de doser la quantité totale d'acide contenu dans chaque tube, le dosage est réalisé par une solution d'hydroxyde de sodium à $2,00 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ en présence de phénolphtaléine. On note V_{eq} le volume de soude versé. Afin de connaître la quantité d'ester apparu, il faut effectuer deux dosages supplémentaires.

– On mélange 23 mL d'eau, 1 mL d'acide sulfurique, on homogénéise et 4,00 mL de ce mélange sont dosés par un volume $V = 3,00 \text{ mL}$ de soude.

– On mélange 11,6 mL d'eau, 11,4 mL d'acide acétique et 1 mL d'acide sulfurique, on homogénéise et 4 mL de ce mélange sont dosés par un volume $V_{\text{eq}}(0)$ de soude. On dresse alors le tableau de mesures suivant :

Date t (min)	Volume de soude à l'équivalence V_{eq} (mL)	Quantité d'acide restant n_{acide} (10^{-3} mol)	Avancement X (10^{-3} mol)
0	19,9		
5	13,7		
10	11,0		
15	9,9		
30	8,8		
45	8,5		

On appelle X , l'avancement de la réaction à l'instant t , $n_{\text{acétique}}$ la quantité de matière d'acide acétique présent à l'instant t , retrouver la relation :

$$X = 2 \cdot 10^{-3} \cdot (V_{\text{eq}}(0) - V_{\text{eq}})$$

- ④ Le dosage de l'acide sulfurique semble inutile puisque le volume V n'intervient pas dans la formule précédente. Calculer la valeur exacte de la quantité de matière d'acide acétique introduit à l'instant $t = 0$. Justifier alors l'intérêt de ce dosage.
- ⑤ Construire la courbe représentant l'avancement X en fonction du temps ; en déduire le rendement de cette estérification.
- ⑥ Au bout de 45 minutes le mélange ne semble plus évoluer, pourquoi ?

Données

Masses molaires atomiques ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$) : C : 12 ; O : 16 ; H : 1. ■

Séquence

> **Physique :**

Énergie mécanique

> **Chimie :**

**Contrôle de l'évolution
d'un système par changement
d'un réactif**

Physique > Énergie mécanique

Chapitre 1	>	Travail d'une force	317
		A Définition	
		B Travail du poids	
		C Travail d'une force de frottement de valeur constante	
		D Travail de la tension d'un ressort	
Chapitre 2	>	Énergie cinétique	322
		A Définition	
		B Théorème de l'énergie cinétique	
Chapitre 3	>	Énergie potentielle	323
		A Énergie potentielle élastique	
		B Énergie potentielle de pesanteur	
Chapitre 4	>	Énergie mécanique	325
		A Définition	
		B Exemples de conservation de l'énergie mécanique	
		C Exemples de non-conservation de l'énergie mécanique	
Résumé	>	.....	328
Exercices	>	.....	329

Chimie > Contrôle de l'évolution d'un système par changement d'un réactif

Chapitre 1	>	Synthèse d'un ester à partir d'un anhydride d'acide et d'un alcool	337
		A Les anhydrides d'acide	
		B Synthèse d'un ester à partir d'un anhydride d'acide	
		C Synthèse de l'aspirine	
		D Identification de l'aspirine par C.C.M.	
Chapitre 2	>	Hydrolyse basique des esters : fabrication d'un savon	341
		A La réaction d'hydrolyse basique d'un ester	
		B Application : la saponification des corps gras	
		C Principe sommaire d'action d'un savon	
Chapitre 3	>	Importance des conditions expérimentales sur le choix d'une réaction : titrage de l'aspirine	344
		A Préparation de la solution	
		B Le dosage	
		C Conclure	
Résumé	>	.....	347
Exercices	>	.....	349

Physique

Objectifs

- ▶ Connaître la définition du travail d'une force et savoir le calculer.
- ▶ Connaître les expressions de l'énergie potentielle de pesanteur et de l'énergie potentielle élastique.
- ▶ Connaître la définition de l'énergie mécanique d'un système. Savoir reconnaître et interpréter la conservation ou la non-conservation de l'énergie mécanique d'un système.

A Définition

1 Produit scalaire

Le produit scalaire de deux vecteurs notés \vec{V}_1 et \vec{V}_2 a pour valeur $V_1 \cdot V_2 \cdot \cos \alpha$.

V_1 et V_2 représentent les normes des deux vecteurs et α l'angle (\vec{V}_1, \vec{V}_2) .

Il est important de noter que le produit scalaire de deux vecteurs n'est pas un vecteur mais un nombre réel, il est aussi égal à $V_{1x}V_{2x} + V_{1y}V_{2y} + V_{1z}V_{2z}$ (somme des produits des coordonnées des deux vecteurs selon chaque axe).

Activité 1 Représenter deux vecteurs unitaires \vec{i} et \vec{j} dont le produit scalaire soit égal à 1, à 0, à -1.

2 Définition du travail d'une force constante au cours d'un déplacement rectiligne

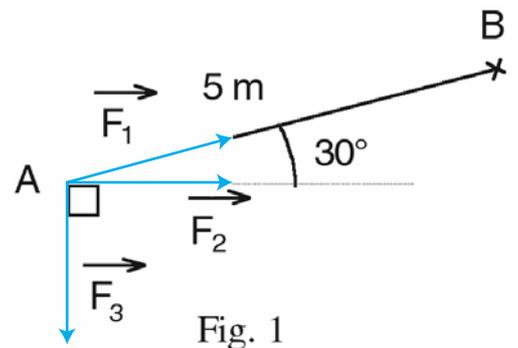
Une force est constante lorsque toutes ses caractéristiques (valeur, direction et sens) restent constantes.

Le travail W d'une force constante \vec{F} dont le point d'application se déplace de A jusqu'en B le long d'un segment AB est égal au produit scalaire du vecteur force \vec{F} par le vecteur déplacement \vec{AB} :

$$W = \vec{F} \cdot \vec{AB}$$

La valeur (ou norme) de la force étant exprimée en newton et la longueur AB en mètre, le travail s'exprime en joule (J).

Activité 2 Calculer, au cours du trajet de A jusqu'en B, le travail de chacune des trois forces \vec{F}_1 , \vec{F}_2 et \vec{F}_3 , de même valeur égale à 12 N, représentées sur le schéma de la figure 1.



3 Travail d'une force dans le cas général

Dans le cas général d'une force qui varie (en grandeur ou en direction) et d'un déplacement qui n'est pas rectiligne, il convient de décomposer le déplacement total en une succession de déplacements très petits pouvant être assimilés à des segments de droite si petits que la force n'a pas le temps de varier au cours de ces petits déplacements : le travail total est la somme algébrique de tous les petits travaux dW correspondant à chaque petit déplacement.

Mathématiquement, l'addition de quantités infinitésimales s'obtient en effectuant une intégration.

Activité 3 Un mobile ponctuel décrit autour d'un point O une trajectoire circulaire de rayon $R = 2,5$ m. Calculer, au cours d'un déplacement correspondant à un tour complet, le travail d'une force \vec{F}_1 de valeur 3,0 N, qui reste constamment dirigée tangentielle à la trajectoire dans le sens du mouvement, puis le travail d'une force \vec{F}_2 de même valeur que \vec{F}_1 mais qui reste constamment dirigée vers le point O.

4 Définition de la puissance

Considérons une force \vec{F} dont le point d'application se déplace.

Soit dW le travail de la force au cours d'un déplacement, entre deux points A et B très voisins, effectué pendant un intervalle de temps dt très court : le déplacement de A vers B étant très petit, le vecteur déplacement \vec{AB} sera noté : $d\vec{\ell}$. La puissance de la force est définie par la relation : $P = \frac{dW}{dt}$.

Les deux points A et B sont suffisamment voisins pour que le vecteur vitesse reste constant (ainsi que le vecteur force) au cours du déplacement. On peut alors écrire : $d\vec{\ell} = \vec{V} \cdot dt$. D'où

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{\vec{F} \cdot d\vec{\ell}}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{V}$$

Le travail étant exprimé en joule et la durée en seconde, la puissance s'exprime en watt (W).

Activité 4 Peut-on affirmer que la puissance d'une force de 10 N, dont le point d'application se déplace avec une vitesse de $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, est égale à 100 W ?

B Travail du poids

Calculons d'abord le travail W du poids d'un objet dont le centre d'inertie se déplace du point A au point A_1 sur le schéma ci-contre.

Sur l'axe vertical ascendant Oz, le point A est repéré par sa cote z_A et le point A_1 par sa cote z_1 .

Le déplacement AA_1 est rectiligne et le poids est une force constante : $\vec{P} = \vec{P} \cdot \vec{AA_1}$. Or, le poids a pour direction l'axe Oz : $\vec{P} = -mg\vec{k}$, le produit scalaire est donc égal au produit de

la coordonnée du poids selon l'axe Oz par la coordonnée de $\vec{AA_1}$ selon cet axe : $W = -mg \cdot (z_1 - z_A)$.

(En effet le produit scalaire de deux vecteurs de coordonnées respectives (X, Y, Z) et (X', Y', Z') vaut : $XX' + YY' + ZZ'$), et dans le cas du poids, seule la coordonnée selon l'axe Oz n'est pas nulle.)

Pour calculer le travail du poids sur l'ensemble du trajet AB, il nous faut découper le parcours AB en une multitude de très petits déplacements $AA_1, A_1A_2, A_2A_3 \dots$

Par analogie avec notre calcul précédent, nous voyons bien qu'au cours d'un petit déplacement tel que A_3A_4 par exemple, le travail vaut $-P(z_4 - z_3)$ et qu'en ajoutant tous ces travaux, nous trouverons finalement pour l'ensemble du parcours AB :

$$W = -P(z_B - z_A) = -mg(z_B - z_A)$$

Cette expression peut être utilisée (sans qu'il soit utile de la redémontrer) chaque fois qu'il s'agit de calculer le travail d'un poids, il est important de remarquer que le résultat obtenu ne dépend que du poids et des cotes des points A et B, mais pas du chemin suivi pour aller de A en B.

Remarque Ce résultat peut aussi être obtenu en écrivant que, lors d'un déplacement élémentaire (c'est-à-dire infiniment petit) $d\vec{\ell}$, le travail élémentaire vaut :

$$dW = \vec{P} \cdot d\vec{\ell} = -P \cdot d\ell \cdot \cos \alpha = -Pdz.$$

Le travail total, lors du déplacement de A en B se calcule en ajoutant tous ces travaux élémentaires, ce qui s'obtient mathématiquement en effectuant une intégration :

$$W = -\int_{z_A}^{z_B} P \cdot dz = -mg(z_B - z_A).$$

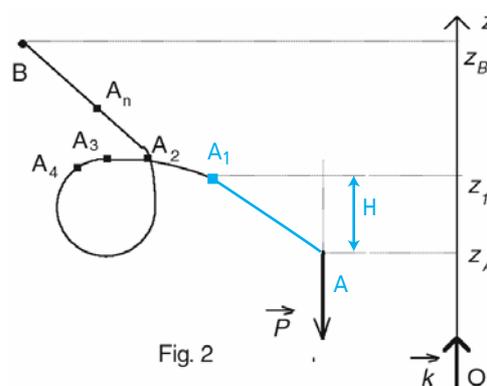


Fig. 2

- Activité 5** Calculer le travail du poids d'un objet de masse 100 g.
- Lorsque le centre d'inertie de l'objet est soulevé de 50 cm.
 - Lorsque le centre d'inertie de l'objet est abaissé de 50 cm.
 - Lorsque le centre d'inertie de l'objet est déplacé de 50 cm le long d'un axe horizontal.
- On prendra $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

- Activité 6** Calculer le travail du poids d'une boule de masse 50 g attachée à un fil de longueur $L = 20 \text{ cm}$ lorsque ce pendule effectue, dans un plan vertical, une rotation de 60° de la position A à la position B. (schéma ci-contre)
- La boule peut être assimilée à un point matériel et la valeur du champ de pesanteur vaut $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

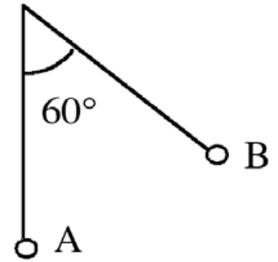


Fig. 3

C Travail d'une force de frottement de valeur constante

Le schéma de la figure 4 représente une piste AB sur laquelle se déplace un mobile.

La force \vec{R} exercée par la piste sur le mobile (appelée réaction de la piste) peut être décomposée en \vec{R}_N normale à la piste et \vec{f} tangentielle à la piste dans le sens opposé à celui du mouvement :

$$\vec{R} = \vec{R}_N + \vec{f}.$$

Par la suite, nous appellerons force de frottement la composante tangentielle \vec{f} et nous

supposons constante sa valeur f . Lors d'un déplacement élémentaire du point M au point M' très

voisin : $\overrightarrow{MM'} = d\vec{\ell}$, le travail de la force de frottement a pour valeur :

$$dW = \vec{f} \cdot d\vec{\ell} = -f \cdot d\ell \cdot \cos(180^\circ) = -f \cdot d\ell.$$

Le travail total de la force de frottement pour le trajet AB de longueur totale $L = \widehat{AB}$ s'obtient par

addition de tous les petits travaux successifs : $W = -\int_0^L f \cdot d\ell = -f \int_0^L d\ell$

$$W = -f \cdot L$$

- Activité 7** Le travail d'une force de frottement de valeur f constante, au cours du déplacement d'un mobile partant d'un point A pour arriver en un point B, est-il indépendant du chemin suivi ?

D Travail de la tension d'un ressort

Sur le schéma de la figure 5, nous avons représenté un ressort de longueur à vide L_0 dans une position telle qu'il se trouve allongé d'une distance x par rapport à sa longueur à vide.

La force de rappel \vec{T}' du ressort est la force exercée par le ressort sur l'opérateur à son extrémité libre. Cette force s'oppose à la déformation du ressort et sa valeur augmente lorsque la déformation augmente selon la relation : $T' = Kx$ dans laquelle K représente une caractéristique du ressort appelée constante de raideur qui s'exprime en $N \cdot m^{-1}$.

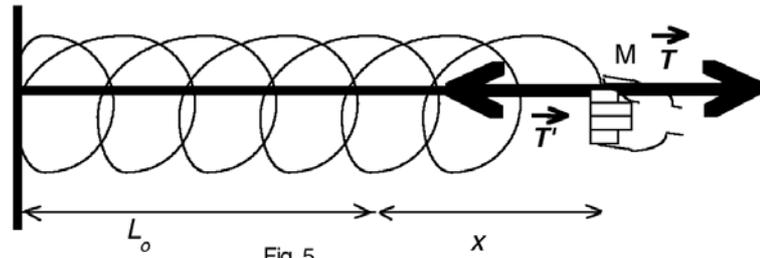


Fig. 5

Pour allonger le ressort, l'opérateur doit exercer sur l'extrémité A une force \vec{T} opposée à \vec{T}' , appelée tension du ressort.

La norme de la force \vec{T} est donc égale à chaque instant à celle de la force \vec{T}' : $T = Kx$.

Si, au cours d'un déplacement du point M au point M' très voisin : $\overrightarrow{MM'} = d\vec{\ell}$, l'allongement du ressort augmente d'une quantité très faible dx , le travail de la force \vec{T} vaudra :

$$dW = \vec{T} \cdot d\vec{\ell} = T \cdot dx = Kx \cdot dx.$$

Cette formule ne peut être appliquée que pour un déplacement très petit puisque la valeur de la force varie au cours du déplacement.

Pour un déplacement important au cours duquel l'allongement du ressort (par rapport à sa longueur à vide) varie de x_1 à x_2 , il faut ajouter tous les petits travaux consécutifs à de très petits déplacements dx . Ce calcul peut être fait de deux façons :

Première méthode : méthode graphique

Le graphe de la figure 6 représente les variations de la valeur de la force F en fonction de l'allongement x du ressort. Sur ce graphique, le travail élémentaire de la force F : $dW = Kx \cdot dx$ (correspondant à un allongement dx du ressort en partant d'un allongement initial égal à x) est représenté par l'aire d'un rectangle de hauteur Kx et de largeur dx (en bleu sur le schéma).

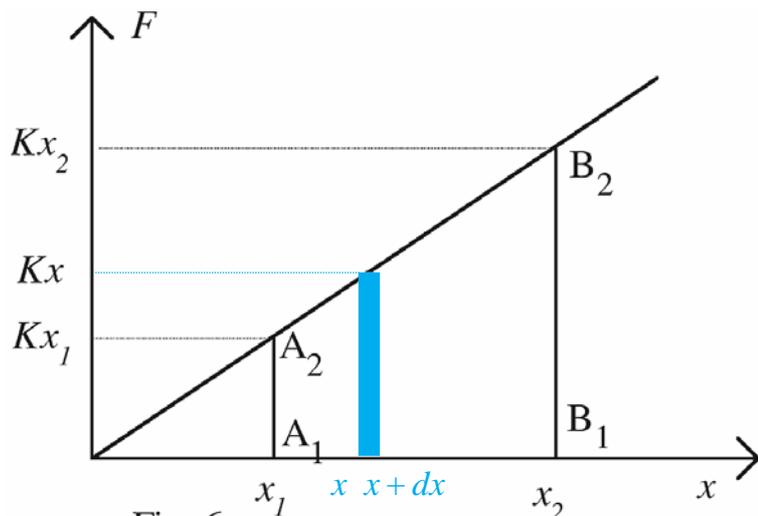


Fig. 6

Pour des raisons de

commodité, on a représenté un allongement dx assez important, mais il ne faut pas oublier que le calcul est fait avec une valeur infiniment faible de dx . Pour calculer le travail total de la force F lorsque l'allongement du ressort passe de x_1 à x_2 , il faut ajouter tous les travaux élémentaires résultant de petits déplacements successifs. Ce travail total sera donc représenté par l'aire du trapèze : $A_1B_1B_2A_2$ qui est la somme des aires des petits rectangles correspondants au déplacements élémentaires.

Comme l'aire de ce trapèze vaut :

$$\left(\frac{\text{grande base} + \text{petite base}}{2} \right) \times \text{hauteur} = \left(\frac{Kx_1 + Kx_2}{2} \right) \times (x_2 - x_1),$$

la valeur du travail est donc

$$W = \frac{K}{2} (x_2^2 - x_1^2)$$

Deuxième méthode : intégration mathématique

Le travail total, obtenu par addition des travaux élémentaires successifs : $dW = Kx \cdot dx$, peut être calculé par intégration (opération mathématique qui consiste à ajouter des termes infinitésimaux) et

on écrit alors : $W = \int_{x_1}^{x_2} Kx \cdot dx = K \int_{x_1}^{x_2} x \cdot dx = K \left[\frac{x^2}{2} \right]_{x_1}^{x_2} = \frac{K}{2} (x_2^2 - x_1^2)$; On retrouve bien le même résultat.

Activité 8 *Un ressort suspendu verticalement a une longueur à vide $L_0 = 20$ cm , son coefficient de raideur vaut :*

$$K = 25 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} .$$

Partant d'une position initiale où la longueur du ressort vaut 22 cm, un opérateur tire sur l'extrémité du ressort jusqu'à ce que la longueur soit égale à 24 cm. Calculer le travail fourni par l'opérateur (travail de la tension du ressort) au cours de ce déplacement.

A Définition

Tout système en mouvement possède de l'énergie appelée énergie cinétique.

Ainsi, l'air en mouvement possède de l'énergie cinétique qui peut être transformée en énergie électrique par une éolienne.

Pour un point matériel de masse m se déplaçant à la vitesse V , l'énergie cinétique est donnée par la relation : $E_c = \frac{1}{2} mV^2$.

Pour un solide de masse M en translation de vitesse V (c'est-à-dire qu'à chaque instant, les vecteurs-vitesse de tous les points du solide sont identiques, de norme égale à V), l'énergie cinétique qui est la somme des énergies cinétiques des points constituant le solide est donnée par :

$$E_c = \frac{1}{2} MV^2$$

En unités SI, la masse doit être exprimée en kg, la vitesse en $m \cdot s^{-1}$ et l'énergie en J.

Naturellement, cette formule ne peut être utilisée que pour un mouvement de translation et ne peut plus être appliquée si la valeur de la vitesse est différente en différents points du solide comme par exemple lors de la rotation du solide autour d'un axe.

Activité 9 Une automobile se déplace en ligne droite à la vitesse de $72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Expliquer pourquoi elle ne constitue pas rigoureusement un solide en translation.

En admettant néanmoins que la formule donnant l'énergie cinétique d'un solide en translation puisse lui être appliquée avec une très bonne approximation, calculer pour quelle vitesse son énergie cinétique serait multipliée par 2.

B Théorème de l'énergie cinétique

Dans un référentiel galiléen, la variation d'énergie cinétique d'un système entre deux instants est égale à la somme algébrique des travaux de toutes les forces appliquées au système entre ces deux instants.

$$E_{c2} - E_{c1} = \sum W$$

Activité 10 Nous avons, dans un chapitre précédent, étudié la trajectoire circulaire d'un satellite terrestre dans le référentiel géocentrique à l'aide de la relation fondamentale de la dynamique.

Appliquer, dans le même référentiel, le théorème de l'énergie cinétique au satellite.

Quel renseignement peut-on ainsi obtenir ?

Activité 11 Dans le référentiel terrestre supposé galiléen, un palet de masse 100 g descend une piste AB de longueur $L = 100 \text{ m}$ présentant une dénivellation $h = 10 \text{ m}$. Nous admettons que les frottements sont négligeables. Calculer le travail du poids de l'objet au cours du trajet AB et en déduire la vitesse du palet en B s'il a quitté le point A sans vitesse initiale $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

A Énergie potentielle élastique

Supposons qu'un opérateur étire un ressort de façon que l'allongement passe de la valeur initiale x_1 à la valeur finale x_2 .

Le travail de l'opérateur vaut alors : $W = \frac{K}{2} (x_2^2 - x_1^2)$. Il peut être mis sous la forme :

$W = E_{p2} - E_{p1}$ en posant $E_{p2} = \frac{K}{2} x_2^2 + \text{cste}$ et $E_{p1} = \frac{K}{2} x_1^2 + \text{cste}$. En effet, la constante notée « cste » disparaît lorsqu'on effectue la soustraction : $E_{p2} - E_{p1}$.

E_{p1} et E_{p2} sont appelées énergies potentielles élastiques initiale et finale du système.

En effet, le travail de l'opérateur qui allonge le ressort correspond à de l'énergie transférée au ressort puisque le ressort déformé est susceptible de redonner de l'énergie en revenant à sa longueur de départ : il peut alors être utilisé pour faire fonctionner un mécanisme.

Par la suite, nous choisirons une valeur nulle pour la constante, ce qui revient à considérer que le ressort ne possède aucune énergie potentielle élastique lorsqu'il n'est ni étiré ni comprimé.

L'énergie potentielle élastique du ressort dont l'allongement est noté x on vaut alors :

$$E_p = \frac{1}{2} Kx^2$$

Cette relation reste valable si le ressort, au lieu d'être allongé, est comprimé par rapport à sa longueur au repos d'une valeur égale à x puisqu'une diminution de longueur revient à un allongement négatif et que l'allongement intervient au carré dans l'expression de l'énergie potentielle élastique.

Bien entendu, l'énergie potentielle élastique, comme toute énergie, s'exprime en joule (J) dans le système international.

Activité 12

Lorsqu'on suspend verticalement une masse de masse 150 g à un ressort, il s'allonge de 5,0 cm.

Calculer, dans cette position d'équilibre, l'énergie potentielle élastique du ressort ($g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$).

B Énergie potentielle de pesanteur

Imaginons un opérateur soulevant une bille de poids \vec{P} en exerçant sur elle une force \vec{F} opposée au poids. Ces deux forces auront la même valeur constante : mg .

Au cours d'un déplacement où l'altitude du centre d'inertie de la bille augmente de la valeur initiale z_1 à la valeur finale z_2 , le travail du poids sera négatif alors que le travail de la force exercée par l'opérateur sera positif et vaudra : $W = mg(z_2 - z_1)$.

En procédant comme nous l'avons fait pour l'énergie potentielle élastique, nous écrivons donc : $W = E_{p2} - E_{p1} = mg(z_2 - z_1)$.

On en déduit : $E_{p2} = mgz_2 + \text{cste}$ et $E_{p1} = mgz_1 + \text{cste}$ puisque la constante notée « cste » disparaît lorsqu'on effectue la soustraction : $E_{p2} - E_{p1}$.

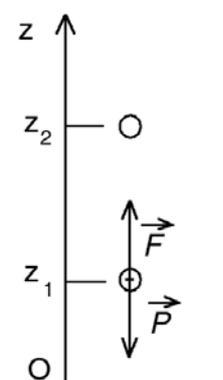


Fig. 7

E_{p1} et E_{p2} sont appelées énergies potentielles de pesanteur.

Là aussi, le travail de l'opérateur qui élève l'objet correspond à de l'énergie transférée à cet objet.

On choisit alors un niveau de référence, pour lequel l'énergie potentielle de pesanteur sera considérée comme nulle et on repère l'altitude du mobile selon un axe vertical ascendant dont l'origine se trouve à l'altitude du niveau de référence.

On aura alors $E_p = 0$ quand $z = 0$ et pour toute valeur de z , on écrira :

$$E_p = mgz$$

Les objets, dont le centre d'inertie est au-dessus du niveau de référence, ont une énergie potentielle de pesanteur positive ; ceux, dont le centre d'inertie est au-dessous du niveau de référence, ont une énergie potentielle de pesanteur négative.

Considérons par exemple deux objets de même masse 1 kg : l'objet 1 est situé à l'étage (5 mètres au-dessus du sol) et l'objet 2 dans la cave (5 mètres au-dessous du sol).

Le champ de pesanteur a pour valeur $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Si nous choisissons le sol comme niveau de référence, nous trouvons : $E_{p1} = 50 \text{ J}$ et $E_{p2} = -50 \text{ J}$.

Si nous choisissons le niveau de la cave comme niveau de référence, nous trouvons : $E_{p1} = 100 \text{ J}$ et $E_{p2} = 0$.

Activité 13 Calculer, en prenant $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, l'énergie potentielle de pesanteur d'un pot de peinture de masse 2 kg situé au premier étage de la tour Eiffel (60 m au-dessus du sol) en choisissant comme niveau de référence : a) le sol ; b) le deuxième étage (120 m au-dessus du sol).

A Définition

L'énergie mécanique E_m d'un système est la somme de son énergie cinétique et de son énergie potentielle :

$$E_m = E_c + E_p$$

Dans le cas où le système possède de l'énergie potentielle sous diverses formes (énergie potentielle élastique, énergie potentielle de pesanteur...), toutes ces différentes formes doivent être comptabilisées dans l'énergie mécanique.

Activité 14 Indiquer plusieurs façons permettant d'augmenter l'énergie mécanique d'un ressort posé sur une table.

Activité 15 Indiquer dans quel cas l'énergie mécanique d'un avion, assimilé à un solide en translation, est la plus grande :

dans l'état 1 : il est à 4,0 km d'altitude et il vole à $600 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

dans l'état 2 : il est à 6,0 km d'altitude et il vole à $400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

(on négligera les variations de g avec l'altitude et on prendra $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)

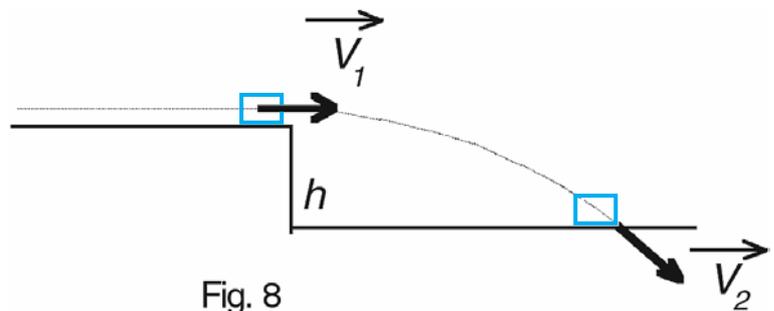
B Exemples de conservation de l'énergie mécanique

1 Règle générale

Lorsqu'un système est abandonné à lui-même et qu'il n'est pas soumis à des forces de frottements, son énergie mécanique se conserve.

2 Application au mouvement d'un projectile dans le champ de pesanteur

Considérons un palet arrivant avec une vitesse de valeur V_1 à l'extrémité d'une table horizontale située à la hauteur h au-dessus du sol. Négligeons la résistance de l'air au cours du mouvement de chute, le palet



n'est plus alors soumis à aucune force de frottement et nous pouvons écrire la conservation de l'énergie mécanique entre l'instant où le palet quitte la table (position 1) et l'instant où il arrive au sol (position 2 et niveau de référence pour l'énergie potentielle de pesanteur) :

$$E_{m1} = E_{m2}, \quad \text{soit} \quad E_{c1} + E_{p1} = E_{c2} + E_{p2} = E_{c2} \quad \text{ou encore :} \quad \frac{1}{2} mV_1^2 + mgh = \frac{1}{2} mV_2^2.$$

On en déduit la valeur de la vitesse V_2 lors de l'arrivée au sol $V_2 = \sqrt{V_1^2 + 2gh}$.

3 Calcul de la vitesse d'un objet suspendu à un ressort vertical

Considérons un solide de masse M suspendu à un ressort vertical de coefficient de raideur K .

Dans la position d'équilibre, l'allongement du ressort vaut : $x_0 = \frac{Mg}{K}$.

Allongeons le ressort d'une longueur supplémentaire a en tirant vers le bas sur le solide et de cette position (notée position 1), abandonnons le sans vitesse initiale.

Nous supposons que les forces de frottement sont négligeables.

Pour calculer la vitesse du solide lorsqu'il repassera par la position d'équilibre (notée position 2), nous allons utiliser la conservation de l'énergie mécanique du système constitué du solide et du ressort (dont la masse est négligeable).

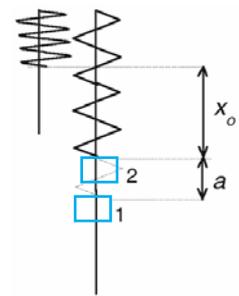


Fig. 9

Dans la position 1 : Énergie cinétique = 0 ; Énergie potentielle élastique = $\frac{1}{2} K(x_0 + a)^2$

Énergie potentielle de pesanteur = 0 (en choisissant cette position comme niveau de référence)

Dans la position 2 : Énergie cinétique = $\frac{1}{2} MV^2$; Énergie potentielle élastique = $\frac{1}{2} Kx_0^2$

Énergie potentielle de pesanteur : Mga

La conservation de l'énergie mécanique s'écrit donc : $\frac{1}{2} K(x_0 + a)^2 = \frac{1}{2} MV^2 + Mga + \frac{1}{2} Kx_0^2$

Ce qui donne en développant et après avoir éliminé les termes « $\frac{1}{2} Kx_0^2$ »

$$\frac{1}{2} Ka^2 + Kx_0a = \frac{1}{2} MV^2 + Mga$$

Cette expression peut être à nouveau simplifiée, compte-tenu de l'égalité $Kx_0 = Mg$ (obtenue en étudiant la position d'équilibre du système).

On trouve ainsi : $Ka^2 = MV^2$ et donc $V = a\sqrt{\frac{K}{M}}$.

Activité 16

On réalise l'expérience précédente avec un ressort horizontal : dans la position 1, le ressort est allongé d'une longueur a , on abandonne alors le mobile sans vitesse initiale et on demande de calculer sa vitesse lorsqu'il repassera par la position d'équilibre où l'allongement du ressort est nul. On supposera que les frottements sont négligeables.

C Exemples de non-conservation de l'énergie mécanique

1 Règle générale

Lorsqu'un système est soumis à des forces de frottements de sens opposé à la vitesse, son énergie mécanique diminue. (Il arrive aussi que les forces de frottements contribuent à augmenter l'énergie mécanique d'un système : mise en rotation d'un disque par friction sur un autre disque, par exemple).

Lorsqu'un système est soumis à l'action d'un opérateur, son énergie mécanique varie : elle peut augmenter ou diminuer selon que l'opérateur donne de l'énergie au système ou en prélève.

La variation d'énergie mécanique est égale au travail des frottements dans le premier cas et au travail de la force exercée par l'opérateur dans le deuxième cas.

2 Intervention d'un opérateur

Choisissons comme système étudié une pierre de masse m posée sur le sol. Un opérateur se saisit de la pierre et la lance. Entre l'instant où la pierre était immobile sur le sol (état 1) et l'instant où elle quitte la main de l'opérateur (état 2), elle a été soumise à son poids et à la force exercée par l'opérateur. En appelant énergie mécanique de la pierre, la somme de son énergie cinétique et de son énergie potentielle de pesanteur, nous obtenons une valeur nulle de l'énergie mécanique dans l'état 1 (le sol est choisi comme niveau de référence pour l'énergie potentielle de pesanteur), alors que la valeur dans l'état 2 est $E_{m2} = mgh + \frac{1}{2} mV^2$.

(h représente l'altitude de la pierre et V sa vitesse à l'instant où elle est lancée)

L'énergie mécanique de la pierre a donc augmenté entre les états 1 et 2, puisqu'elle a gagné à la fois de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle de pesanteur, ce gain d'énergie mécanique est égal au travail fourni par l'opérateur.

Mais l'opérateur peut aussi agir en diminuant l'énergie mécanique d'un objet : lorsque vous bloquez un ballon qui avait de la vitesse, vous annulez son énergie cinétique et vous lui faites donc perdre de l'énergie mécanique et si vous prenez un objet posé sur votre bureau pour le poser, immobile, sur le sol, vous diminuez son énergie potentielle de pesanteur et donc vous diminuez son énergie mécanique.

3 Manifestation des frottements

Lors de son mouvement de chute verticale, un objet abandonné sans vitesse initiale à une hauteur h au-dessus du sol prend d'abord de la vitesse par transformation progressive de son énergie potentielle de pesanteur en énergie cinétique, mais si la chute dure longtemps, sa vitesse finit par se stabiliser.

L'énergie cinétique est alors constante alors que l'énergie potentielle de pesanteur continue à diminuer.

Globalement, l'énergie mécanique diminue donc : sa variation est due au travail des forces de frottement, c'est-à-dire dans ce cas à la « résistance de l'air ».

De même, on constate une diminution de l'énergie mécanique lorsqu'on regarde osciller un objet suspendu à un ressort : l'amplitude des oscillations décroît progressivement jusqu'à l'arrêt complet.

Cette diminution est due là aussi aux frottements : résistance de l'air lorsque l'objet oscille à l'extrémité d'un ressort suspendu verticalement et frottements au contact du support si l'objet est posé sur un support et accroché à l'extrémité du ressort horizontal.

Remarques

1 Lorsque les frottements sont trop importants, ils peuvent empêcher les oscillations de l'objet accroché au ressort et l'objet rejoint alors sa position d'équilibre sans osciller.

2 L'action des frottements fait diminuer l'énergie mécanique d'un système, mais pourtant l'énergie n'est pas perdue : elle est transformée en énergie « interne » et on constate alors un échauffement du système et de son environnement (support ou atmosphère).

Résumé

► Travail W d'une force constante \vec{F} dont le point d'application se déplace de A jusqu'en B le long d'un segment AB : $W = \vec{F} \cdot \vec{AB}$.

► Dans le cas général d'une force qui varie (en grandeur ou en direction) et d'un déplacement qui n'est pas rectiligne, il convient de décomposer le déplacement total en une succession de déplacements très petits pouvant être assimilés à des segments de droite si petits que la force n'a pas le temps de varier au cours de ces petits déplacements ; le travail total est la somme algébrique de tous les petits travaux dW correspondant à chaque petit déplacement. Mathématiquement, l'addition de quantités infinitésimales s'obtient en effectuant une intégration.

► Puissance d'une force dont le point d'application se déplace à la vitesse \vec{V} : $P = \frac{dW}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{V}$

► Travail du poids d'un objet lors d'un déplacement de A en B, repérés par leur cote z selon un axe vertical ascendant : $W = -P(z_B - z_A) = -mg(z_B - z_A)$.

► Travail d'une force de frottement de valeur f constante, le long d'un trajet AB de longueur totale $L = \widehat{AB}$: $W = -f \cdot L$.

► Travail de la force appelée tension d'un ressort et exercée par un opérateur pour étirer ce ressort d'un allongement initial x_1 à l'allongement final x_2 : $W = \frac{K}{2} (x_2^2 - x_1^2)$.

► Énergie cinétique d'un solide de masse M en translation de vitesse V : $E_c = \frac{1}{2} MV^2$.

► Dans un référentiel galiléen, la variation d'énergie cinétique d'un système entre deux instants est égale à la somme algébrique des travaux de toutes les forces appliquées au système entre ces deux instants : $E_{c2} - E_{c1} = \sum W$

► Énergie potentielle élastique d'un ressort dont l'allongement est noté x : $E_p = \frac{1}{2} Kx^2$.

Cette relation reste valable si le ressort, au lieu d'être allongé, est comprimé par rapport à sa longueur au repos d'une valeur égale à x .

► Énergie potentielle de pesanteur d'un mobile de masse m : $E_p = mgz$ (en repérant l'altitude du centre d'inertie d'un mobile selon un axe vertical ascendant dont l'origine se trouve à l'altitude du niveau choisi comme référence)

► L'énergie mécanique E_m d'un système est la somme de son énergie cinétique et de son énergie potentielle : $E_m = E_c + E_p$

► Lorsqu'un système est abandonné à lui-même et qu'il n'est pas soumis à des forces de frottements, son énergie mécanique se conserve.

► Lorsqu'un système est soumis à des forces de frottements de sens opposé à la vitesse, son énergie mécanique diminue.

Lorsqu'un système est soumis à l'action d'un opérateur, son énergie mécanique varie : elle peut augmenter ou diminuer selon que l'opérateur donne de l'énergie au système ou en prélève.

La variation d'énergie mécanique est égale au travail des frottements (toujours négatif) dans le premier cas et au travail de la force exercée par l'opérateur dans le deuxième cas.

Exercices

- Connaître la définition du travail d'une force et savoir le calculer.

Exercice ❶ Travail d'une force constante

Le point d'application d'une force \vec{F} constante (en valeur, direction et sens) se déplace de A en B, sur un segment rectiligne AB de longueur $L = 3,5 \text{ m}$ en faisant avec le vecteur \vec{AB} un angle noté α .

Compléter le tableau ci-dessous où figurent la valeur F de la force, son travail W lors du déplacement AB et l'angle α .

F (en N)	5,2	5,2		8,0	8,0	8,0	10
α (en °)	35	90	50		150	320	
W (en J)			10	10			-35

Exercice ❷ Travail de la tension d'un ressort

Le coefficient de raideur d'un ressort vaut : $K = 100 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$.

- 1 Calculer la force, appelée tension du ressort, que doit exercer sur ce ressort un opérateur lorsque l'allongement vaut : 1,0 cm ; 2,0 cm ; 4,0 cm.
- 2 Tracer la courbe représentant la valeur T de la tension du ressort en fonction de l'allongement x . On se limitera aux valeurs de x inférieures à 5 cm.
- 3 À partir d'un allongement initial de 2,0 cm, l'opérateur étire le ressort d'une petite distance supplémentaire égale à 1 mm. En considérant que cet allongement supplémentaire soit suffisamment faible pour que la variation de la tension du ressort soit négligeable, calculer le travail fourni par l'opérateur (travail de la tension du ressort). Indiquer par quoi est représenté, sur votre graphique, ce travail fourni par l'opérateur.
- 4 L'opérateur allonge le ressort d'une valeur initiale de 1,0 cm à une valeur finale de 4,0 cm. Par quoi est représenté, sur votre graphique, le travail fourni par l'opérateur ? En déduire la valeur de ce travail.
- 5 Retrouver, par intégration, le résultat de la question précédente.

- Connaître les expressions de l'énergie potentielle de pesanteur et de l'énergie potentielle élastique.

Exercice ❸ Vrai ou faux

Indiquer, pour chacune des propositions suivantes, si elle est exacte ou non.

Pour chacune de ces propositions, l'énergie potentielle de pesanteur est nulle quand l'objet est posé sur le sol et l'énergie potentielle élastique d'un ressort est nulle quand il n'est ni comprimé ni allongé.

- 1 L'énergie potentielle de pesanteur d'un objet double quand sa hauteur par rapport au sol double.
- 2 L'énergie potentielle élastique d'un ressort double quand son allongement double.
- 3 L'énergie potentielle de pesanteur peut être négative.
- 4 L'énergie potentielle élastique peut être négative.
- 5 L'énergie potentielle de pesanteur d'un objet situé à un mètre au-dessus du sol est égale à l'énergie potentielle de pesanteur de ce même objet situé à un mètre au-dessous du sol ;

- ⑥ L'énergie potentielle élastique d'un ressort allongé de 1 cm par rapport à sa longueur au repos est la même que l'énergie potentielle élastique du même ressort comprimé de 1 cm par rapport à sa longueur au repos.

Exercice ④ Énergie potentielle de pesanteur

Un objet de masse $M = 2,5 \text{ kg}$ est posé au sol en un lieu où le champ de pesanteur vaut : $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

L'énergie potentielle de pesanteur est alors considérée comme nulle.

- ① Quelle est l'énergie potentielle de pesanteur de l'objet lorsque vous le soulevez à une hauteur de 1,40 m ?
- ② En le conservant à cette même hauteur par rapport à vous, vous montez un escalier dont les marches ont une hauteur de 16 cm. De combien augmente l'énergie potentielle de pesanteur de l'objet chaque fois que vous montez une marche ? D'où provient ce gain d'énergie ?
- ③ Après avoir monté quinze marches, vous posez l'objet sur le palier. Combien vaut alors son énergie potentielle de pesanteur ?
- ④ Pourquoi la relation utilisée pour l'énergie potentielle de pesanteur ne pourrait-elle plus être utilisée si l'objet était emporté par un satellite à une hauteur de plusieurs milliers de kilomètres au-dessus du sol ?

Exercice ⑤ Énergie potentielle élastique

L'énergie potentielle élastique du ressort est nulle lorsqu'il n'est ni étiré ni comprimé.

L'intensité du champ de pesanteur vaut : $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

On dispose d'un ressort de longueur à vide $L_0 = 15 \text{ cm}$ et de raideur $K = 35 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$.

- ① Calculer l'énergie potentielle élastique du ressort lorsqu'il est allongé de 2,4 cm.
- ② Par rapport à cette position initiale, de combien faudrait-il allonger le ressort pour que son énergie potentielle élastique double ?
- ③ Le ressort est suspendu verticalement à un crochet fixe. Comme sa masse est négligeable, son allongement est alors nul.
 - a) On suspend, à son extrémité libre, une masse de 100 g. Quel sera son allongement x_0 dans la position d'équilibre ? Combien vaudra alors soit énergie potentielle élastique ?
 - b) Pourquoi la formule utilisée pour l'énergie potentielle élastique du ressort ne serait-elle plus utilisable si on suspendait à son extrémité libre une masse de 10 kg ?

► Connaître la définition de l'énergie mécanique d'un système. Savoir reconnaître et interpréter la conservation ou la non-conservation de l'énergie mécanique d'un système.

Exercice ⑥ Projectile lancé verticalement

L'intensité du champ de pesanteur vaut : $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Dans tout cet exercice, on négligera la résistance de l'air.

Un projectile, de masse $M = 100 \text{ g}$, est lancé, depuis un point O situé à l'altitude $h_0 = 1,50 \text{ m}$ au dessus du sol, avec une vitesse \vec{V}_0 verticale, dirigée vers le haut, de valeur $V_0 = 8,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

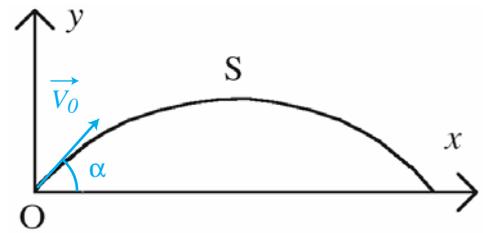
- ① L'énergie mécanique de l'objet se conserve-t-elle au cours du mouvement après le lancement en O ?
- ② On prend le niveau de référence pour l'énergie potentielle de pesanteur au niveau du sol.
 - a) Quelle est la valeur de l'énergie potentielle du projectile en O ?
 - b) Quelle sera sa valeur quand le projectile atteindra le point S d'altitude maximale sur la trajectoire ?
 - c) Calculer la valeur de cette altitude maximale.
 - d) Calculer la vitesse du projectile lorsqu'il retombera au sol.

- ③ Reprendre les calculs de la question précédente en choisissant le niveau de référence pour l'énergie potentielle de pesanteur au niveau du point O de lancement.

Exercice 7 Mouvement parabolique

L'intensité du champ de pesanteur vaut : $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Dans tout cet exercice, on négligera la résistance de l'air et on choisira le sol comme niveau de référence pour l'énergie potentielle de pesanteur.

Un projectile, de masse M , est lancé, depuis un point O situé au sol avec une vitesse \vec{V}_0 faisant un angle α avec l'horizontale.

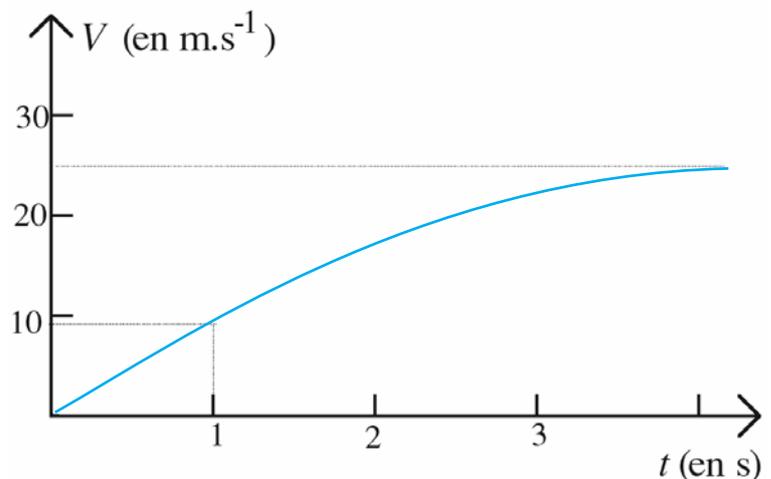


- ① Établir les équations paramétriques du mouvement.
- ② En déduire la date t_s à laquelle le projectile passe au sommet S de sa trajectoire, puis les coordonnées du point S ainsi que la valeur de la vitesse du projectile en S.
- ③ En déduire l'énergie mécanique du projectile en S et comparer à la valeur de l'énergie mécanique initiale. Conclusion ?

Exercice 8 Résistance de l'air

Abandonnée sans vitesse initiale, une bille, de masse $m = 100 \text{ g}$, tombe verticalement dans le champ de pesanteur ($g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$).

- ① La courbe ci-contre représente les variations de la vitesse de la bille en fonction du temps. Expliquer en quoi cette courbe permet d'affirmer qu'il n'y a pas conservation de l'énergie mécanique au cours du mouvement.



Quelle serait l'allure de la courbe si l'énergie mécanique se conservait ?

- ② Au bout d'un certain temps, la vitesse de chute se stabilise à la valeur $V = 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Calculer, lorsque la vitesse est ainsi stabilisée, la perte de l'énergie mécanique de la bille pour un intervalle de temps de quatre secondes.
La variation d'énergie mécanique étant égale au travail de la résistance de l'air qui est la seule force agissant sur la bille en plus de son poids, en déduire la valeur de la résistance de l'air (lorsque la bille tombe à la vitesse de $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) puis retrouver ce résultat par une autre méthode.
- ③ Déterminer, à partir de l'enregistrement, la valeur approximative de la distance parcourue par la bille au cours des deux premières secondes de chute.

Exercice 9 Variation de l'énergie mécanique dans un mouvement de chute libre

On abandonne, sans vitesse initiale, un objet de masse $m = 150 \text{ g}$, à $80,0$ mètres au-dessus du sol qui sera pris comme niveau de référence pour l'énergie potentielle de pesanteur. Le tableau ci-dessus indique la valeur V de la vitesse de l'objet en fonction de son altitude h au-dessus du sol.

On donne : $g = 9,80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

h (en m)	80,0	70,0	60,0	50,0	40,0	30,0	20,0	10,0
V (en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0	12,3	16,6	19,5	21,8	23,6	25,0	26,4

1 Compléter le tableau en indiquant, dans chaque colonne, la valeur de l'énergie cinétique, de l'énergie potentielle de pesanteur et de l'énergie mécanique. Comment évolue l'énergie mécanique au cours du temps ?

Tracer les courbes représentant les variations de ces trois grandeurs en fonction de l'altitude h.

2 Quelle serait l'allure de ces trois courbes si la résistance de l'air était négligeable ?

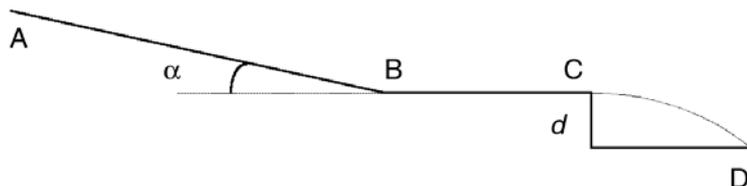
Exercice 10 Vitesse d'un skieur

On donne

$$g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

Un skieur assimilé à un point matériel de masse $m = 70 \text{ kg}$ descend une piste AB,

de longueur $L = 200 \text{ m}$, inclinée d'un angle $\alpha = 15^\circ$ par rapport à l'horizontale, en partant sans vitesse initiale d'un point A. Dans tout l'exercice, l'altitude du point B sera choisie comme niveau de référence pour l'énergie potentielle de pesanteur.



1 Calculer l'énergie mécanique du skieur en A et en déduire sa vitesse en B si les frottements étaient négligeables. (on donnera le résultats en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ et en $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)

2 En fait, le skieur est chronométré à son passage en B avec une vitesse de $72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Calculer l'énergie mécanique du skieur en B et en déduire la valeur de la force de frottement (supposée constante, de même direction que le vecteur-vitesse mais de sens opposé) exercée par la piste sur le skieur sachant que la variation d'énergie mécanique entre A et B est égale au travail de cette force de frottement sur le parcours AB.

3 Le skieur aborde ensuite, avec la vitesse de $72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, une partie horizontale BC de longueur 55 m. Sa vitesse lorsqu'il arrive en C ne vaut plus que $54 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

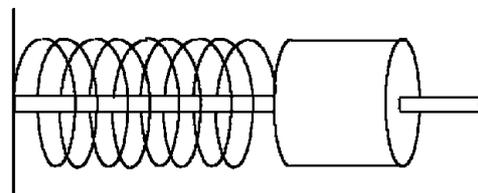
Calculer la variation de son énergie mécanique entre les passages en B et en C. Cette valeur est-elle compatible avec l'hypothèse selon laquelle les frottements auraient conservé sur ce trajet BC la même valeur constante que celle calculée sur la partie AB ?

4 Le skieur aborde avec la vitesse horizontale de $54 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ une dénivellation $d = 2 \text{ m}$ et retombe en D sur une partie horizontale de la piste.

Calculer sa vitesse lorsqu'il retombe en D (on néglige la résistance de l'air lors de la chute).

Exercice 11 Oscillateur harmonique

Un cylindre, de masse $M = 400 \text{ g}$, est évidé de façon à permettre le passage d'une tige sur laquelle il coulisse sans frottement. Le cylindre est lié à l'extrémité d'un ressort de raideur $K = 16 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ dont l'autre extrémité est solidaire d'un support fixe. Écarté initialement de sa position d'équilibre d'une distance $a = 2,0 \text{ cm}$ et abandonné sans vitesse initiale, le cylindre oscille horizontalement et, les frottements étant négligeables, les oscillations ne sont pas amorties : ce système constitue alors un oscillateur harmonique.



1 Établir l'équation différentielle vérifiée par l'allongement x du ressort.

2 La solution de cette équation différentielle est : $x = a \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$, compte-tenu des conditions initiales caractérisées par une vitesse nulle et un allongement a du ressort. En déduire l'expression littérale puis la valeur numérique de la période T des oscillations.

- ③ Déterminer l'expression littérale de la vitesse du solide et en déduire celle de l'énergie cinétique.
- ④ Tracer, sur un même graphique, les courbes représentant les variations de l'énergie cinétique, de l'énergie potentielle élastique et de l'énergie mécanique en fonction du temps. On précisera les valeurs numériques des graduations selon les axes.

Exercice 12 Oscillateur amorti

On reprend le dispositif précédent ($K = 16 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ et $M = 400 \text{ g}$), le cylindre étant muni d'un dispositif permettant de mesurer l'allongement du ressort à chaque instant. Les mesures sont enregistrées sur un ordinateur interfacé qui permet d'obtenir directement la courbe $x = f(t)$ ainsi qu'un tableau regroupant les valeurs de l'allongement du ressort et de la vitesse du mobile à différentes dates.

t (en s)	0	0,2	0,40	0,6	1,0	1,5	2,0	3,0
x (en cm)	5,0	1,8	-2,8	-2,8	2,4	-1,7	1,2	0,6
dx/dt (en m · s ⁻¹)	0,0	-0,26	-0,14	0,12	0,0	0,0	0,0	0,0

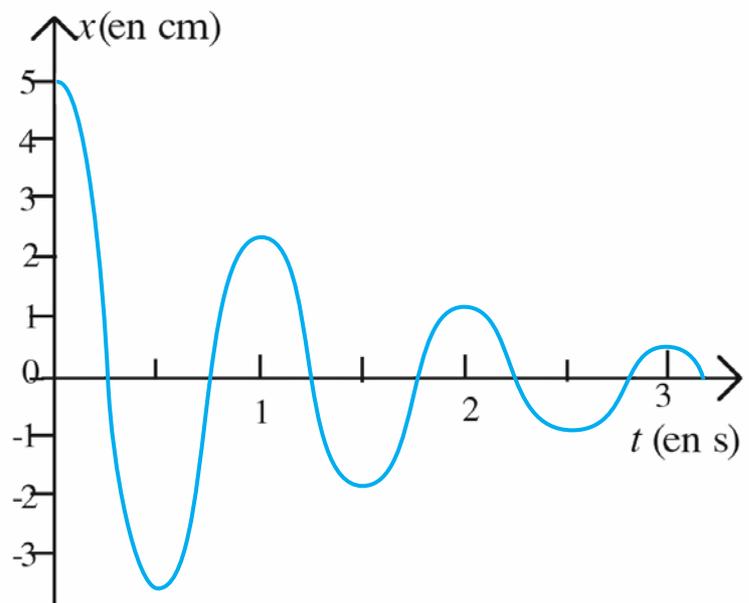
① Déduire de la courbe la valeur de la pseudo-période des oscillations.

② Expliquer comment l'observation de la courbe suffit pour constater que l'énergie mécanique n'est pas conservée au cours du mouvement.

③ Calculer l'énergie mécanique aux différentes dates indiquées sur le tableau.

④ On émet l'hypothèse que l'énergie mécanique du système varie en fonction du temps selon la relation : $E_m = E_0 - bt$ dans laquelle E_0 représente l'énergie mécanique à la date $t = 0$ et b une valeur constante.

Sans tracer la courbe représentant les variations de E_m en fonction du temps, indiquer si cette hypothèse est en accord avec les résultats expérimentaux.



Exercice 13 Oscillateur à deux ressorts

Un oscillateur est constitué d'un disque de masse $m = 100 \text{ g}$ et de deux ressorts : le premier, noté (R_1), caractérisé par un coefficient de raideur $K_1 = 10 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ et le second, noté (R_2), caractérisé par un coefficient de raideur $K_2 = 30 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$.

Dans tout l'exercice, l'intensité du champ de pesanteur vaut : $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ et les frottements sont négligeables.

① Le système est maintenu horizontalement à l'aide d'un fil passant dans les deux ressorts et traversant le disque par un petit orifice prévu à cet effet.



On constate que, dans la position d'équilibre, le ressort (R_1) est allongé d'une longueur $x_{eq1} = 3,0$ cm par rapport à sa longueur à vide.

a) Calculer l'allongement x_{eq2} du ressort (R_2) dans cette position d'équilibre et l'énergie potentielle élastique E_{pe} du système dans cette position d'équilibre.

b) On étire alors le ressort (R_1) d'un centimètre de plus en déplaçant le disque vers la droite, son allongement devenant donc $x_{01} = 4,0$ cm et on abandonne l'ensemble sans vitesse initiale. Calculer l'énergie mécanique $E_{mé}$ du système dans cette position initiale.

c) Calculer la vitesse du disque lorsqu'il repassera par sa position d'équilibre.

d) Quelle sera la valeur de l'allongement de (R_1) lorsque la vitesse du disque deviendra nulle pour la première fois depuis le début du mouvement ?

② Le système est maintenant disposé verticalement, le ressort (R_1) étant en bas.

On constate que, dans la position d'équilibre, le ressort (R_1) est allongé d'une longueur $x_{eq1} = 0,5$ cm par rapport à sa longueur à vide.

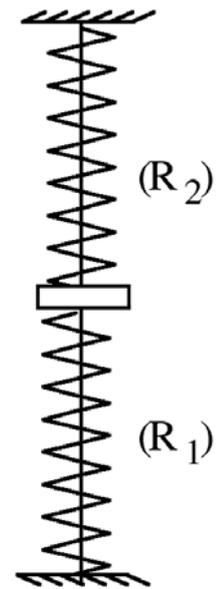
On notera E_p l'énergie potentielle totale du système : énergie potentielle élastique et énergie potentielle de pesanteur dont le niveau de référence sera choisi à l'altitude correspondant à la position d'équilibre du système.

a) Calculer l'allongement x_{eq2} du ressort (R_2) dans cette position d'équilibre et l'énergie potentielle totale E_{pe} du système dans cette position d'équilibre.

b) On étire alors le ressort (R_1) d'un centimètre de plus en déplaçant le disque vers le haut, son allongement devenant donc $x_{01} = 1,5$ cm et on abandonne l'ensemble sans vitesse initiale. Calculer l'énergie mécanique $E_{mé}$ du système dans cette position initiale.

c) Calculer la vitesse du disque lorsqu'il repassera par sa position d'équilibre.

d) Quelle sera la valeur de l'allongement de (R_1) lorsque la vitesse du disque deviendra nulle pour la première fois depuis le début du mouvement ?



Chimie

Objectifs

- ▶ Calculer le rendement d'une transformation.
- ▶ Mettre en œuvre le matériel de laboratoire : chauffage à reflux, distillation fractionnée, cristallisation, filtration sous vide, chromatographie sur couche mince, en justifiant le choix du matériel à utiliser.
- ▶ Respecter les consignes de sécurité.
- ▶ Justifier les étapes d'un protocole.
- ▶ Écrire l'équation de la réaction d'un anhydride d'acide sur un alcool et de l'hydrolyse basique d'un ester.
- ▶ Savoir que l'action d'un anhydride d'acide sur un alcool est rapide, qu'elle donne un ester et que l'avancement maximal est atteint.
- ▶ Savoir que l'hydrolyse basique d'un ester est rapide et que l'avancement maximal est atteint.
- ▶ Identifier la partie hydrophile et la partie hydrophobe d'un ion carboxylate à longue chaîne.



Le but de cette séquence est de montrer que le changement d'un réactif peut modifier l'évolution d'un système en modifiant la transformation chimique qu'elle subit : la transformation, initialement limitée, peut devenir totale ; lente, elle peut devenir plus rapide.

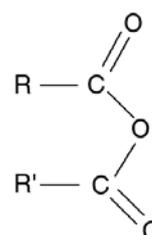
A Les anhydrides d'acide

Les anhydrides d'acide sont des composés considérés comme des dérivés d'acides carboxyliques, car ils sont généralement synthétisés à partir des acides carboxyliques.

Activité 1 Écrire la formule développée générale d'un acide carboxylique.

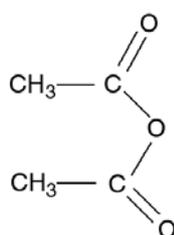
La formule générale d'un anhydride d'acide est :

Avec R et R' : des groupes alkyle (ou autre)

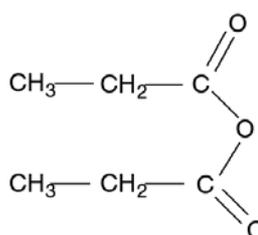


Le nom d'un anhydride d'acide s'obtient en remplaçant le préfixe « acide » du nom de l'acide carboxylique correspondant, par le préfixe « anhydride ».

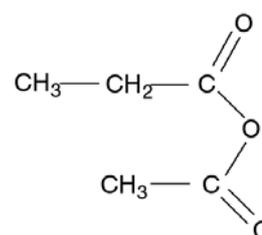
Exemple



anhydride éthanoïque
(ou acétique)



anhydride propanoïque



Anhydride éthanoïque
et propanoïque :

Les anhydrides d'acide sont des liquides (ou des solides) dans les conditions habituelles de température et de pression.

Ils sont très irritants pour les yeux, les muqueuses et la peau, car ils réagissent avec l'eau pour donner l'acide carboxylique dont ils dérivent. Il faut donc les manipuler avec précaution (sous la hotte avec gants et lunettes) en utilisant de la verrerie sèche.

B Synthèse d'un ester à partir d'un anhydride d'acide

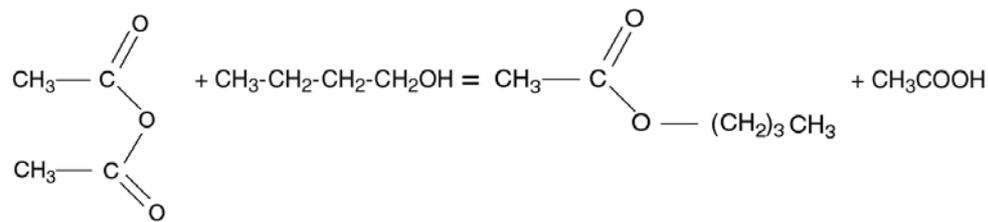
Nous avons vu, dans la séquence précédente, que la réaction d'estérification est la synthèse d'un ester à partir d'un alcool et d'un acide carboxylique. Cette réaction est lente et non totale.

Nous allons voir ici qu'il est possible de synthétiser un ester en remplaçant l'acide carboxylique par un de ses dérivés comme un anhydride d'acide.

Dans un erlenmeyer, introduire 30 mL de butan-1-ol et 31 mL d'anhydride éthanoïque.

Adapter un réfrigérant à air et placer le tout dans un bain-marie à 60 °C environ pendant une demi-heure. L'ester se forme alors.

L'équation de la réaction associée à la transformation subie par le système est :



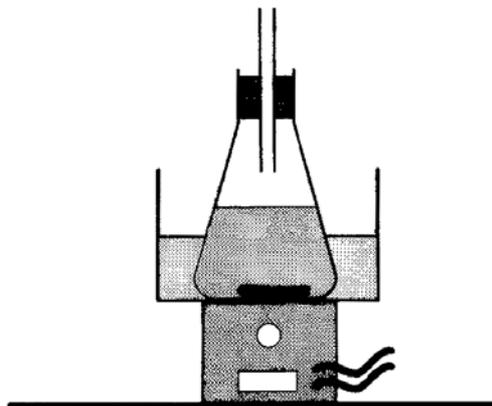
Anhydride éthanoïque

butan-1-ol

éthanoate de butyle

acide éthanoïque

Cette transformation, qui se fait à température modérée, est **moins lente** que celle faisant intervenir l'acide carboxylique correspondant, et est, de plus, **totale (avancement maximal atteint)**.



C Synthèse de l'aspirine

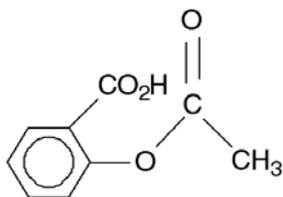
L'aspirine est un médicament antipyrétique et analgésique.

Activité 2 Donner la signification de ces 2 qualificatifs.

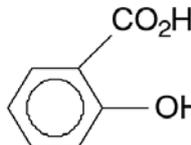
C'est un des médicaments les plus utilisés dans le monde (20 000 tonnes par an).

L'aspirine est contenu dans de nombreux médicaments, soit sous forme de comprimés purs, soit sous forme associée (aspégic, Migpriv...).

En nomenclature officielle, l'Aspirine porte le nom d'acide acétylsalicylique et a pour formule :



Activité 3 Quels groupes fonctionnels reconnaît-on sur la molécule ?

L'aspirine peut donc être synthétisée à partir de : l'acide salicylique  et l'anhydride éthanoïque.

Activité 4 Quel rôle joue l'acide salicylique ? Écrire l'équation de la réaction.

Dans un erlenmeyer, introduire 10 g d'acide salicylique, 16 mL d'anhydride éthanoïque et 5 gouttes d'acide sulfurique. Adapter un réfrigérant à eau et placer le tout dans un bain-marie à 60 °C environ pendant une vingtaine de minutes. Refroidir, puis verser le contenu du ballon dans un bécher contenant environ 60 mL d'eau glacée, en agitant : le produit brut précipite alors.

Filter le mélange obtenu puis rincer les cristaux avec de l'eau glacée. Essorer.

L'acide acétylsalicylique obtenu n'est pas pur ; il faut le purifier par **recristallisation** (voir fiche en fin de livret).

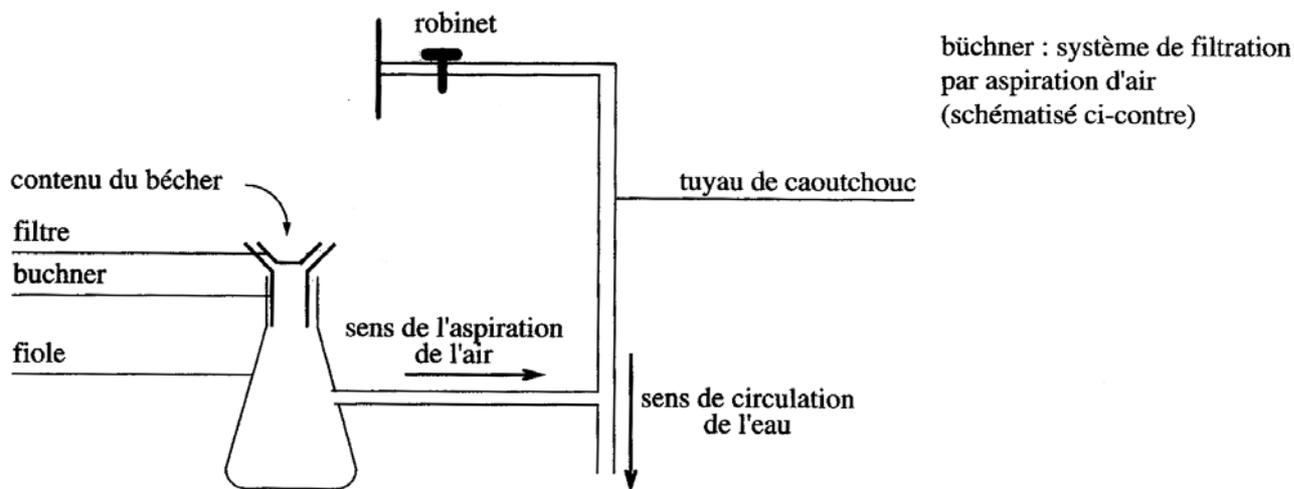
Recristalliser le produit par le minimum de solvant (mélange eau – éthanol à 50 % en volume chacun) ; pour cela, il faut dissoudre les cristaux dans le minimum de solvant à chaud.

Activité 5 Schématiser le montage à construire pour effectuer cette opération (attention le solvant contient de l'éthanol).

Une fois les cristaux dissous, laisser refroidir la solution lentement : le produit pur cristallise progressivement.

Finir le refroidissement en plaçant le ballon dans de la glace et filtrer la solution de manière à récupérer les cristaux.

Filtrer à l'aide d'un système de filtration Büchner (voir schéma ci-dessous), essorer, puis sécher les cristaux purs à l'étuve.



Peser le produit pur ; on obtient ici $m = 8,48 \text{ g}$.

Activité 6

- 1 Calculer la quantité initiale de chaque réactif et trouver le réactif limitant.
- 2 En déduire la valeur du rendement de la synthèse.

Données : masses molaires ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$) : acide salicylique : 138 ; anhydride éthanoïque : 102 ; aspirine : 180.

Densité de l'anhydride éthanoïque : 1,08.

Le rendement obtenu est inférieur à 100%, 2 raisons peuvent être avancées : perte de matière lors de la recristallisation ; transformation non terminée.

D Identification de l'aspirine par C.C.M.

Il reste à identifier l'aspirine ainsi fabriquée ; on dispose de 2 méthodes :

- Mesurer son point de fusion au banc Kofler et comparer la valeur obtenue avec la valeur trouvée dans les tables : $168 \text{ }^\circ\text{C}$, si les valeurs sont égales ; alors le produit est de l'aspirine pure.
- Faire une Chromatographie sur Couche Mince du produit obtenu et comparer son chromatogramme avec celui d'aspirine du commerce (voir fiche en fin de livret).

Verser, dans la cuve à chromatographie, un mélange de solvants appelé **éluant** et constitué d'acétate de butyle, de cyclohexane et d'acide méthanoïque (dans les proportions volumiques 6/4/1).

Faire 3 dépôts sur la plaque de silice :

- 1 un dépôt de produit purifié obtenu,
- 2 un dépôt d'aspirine pure du commerce,
- 3 un dépôt d'acide salicylique.

(ces 3 produits étant préalablement dissous dans de l'acétate de butyle, à raison de 30 mg pour 0,5 mL de solvant environ).

Après migration de l'éluant, séchage de la plaque puis révélation (lampe U.V. par exemple), on obtient les résultats suivants :

			0
0	0		
1	2	3	

Activité 7 À partir du chromatogramme, quelle conclusion peut-on faire sur le produit synthétisé ?

A La réaction d'hydrolyse basique d'un ester

Nous avons vu, dans la séquence précédente, que l'hydrolyse d'un ester est une réaction limitée. Cette réaction peut être rendue totale si cette hydrolyse est effectuée en présence d'une base forte telle que la solution d'hydroxyde de sodium ou d'hydroxyde de potassium.

La réaction porte alors le nom de saponification (du latin « sapo » qui signifie savon) car elle peut conduire à des savons, comme nous le verrons plus loin.

L'équation de la réaction s'écrit :



Le milieu étant basique, l'acide carboxylique est obtenu sous la forme de sa base conjuguée : l'ion carboxylate. À noter que ce dernier ne réagit pas avec l'alcool, aussi la réaction inverse n'a-t-elle pas lieu.

Activité 8 *Quel est alors le rendement théorique de la réaction de saponification ?*

Ainsi, la réaction d'hydrolyse d'un ester est limitée et lente, la réaction de saponification d'un ester est **lente et totale**.

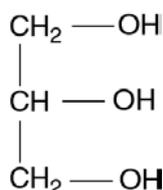
B Application : la saponification des corps gras

1 Les Triglycérides

La préparation d'un savon est la principale application de la réaction de saponification. Un savon est fabriqué à partir de corps gras qui sont des esters naturels.

En effet les corps gras solides (graisses) ou liquides (huiles) sont, pour la majeure partie d'entre eux (95 %), des triesters du glycérol (propane 1,2,3-triol), et d'acides gras. Ces esters sont appelés, triglycérides.

La formule du glycérol est :



Les acides gras sont des acides carboxyliques à longue chaîne carbonée linéaire (de 4 à 22 atomes de carbones) pouvant éventuellement posséder une ou plusieurs liaisons C=C (insaturations).

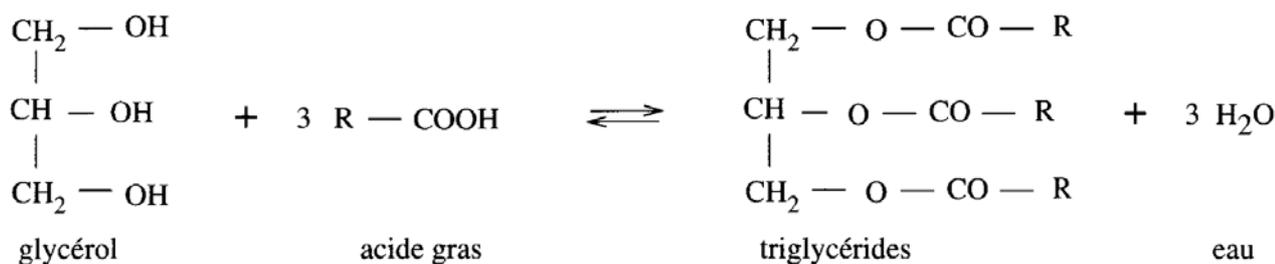
Les huiles sont plus riches en triesters d'acides gras insaturés, tandis que les graisses sont plus riches en triester d'acides gras saturés.

Exemple : acide palmitique (saturé) : $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_{14}\text{-COOH}$

Acide oléique (insaturé) : $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_7\text{-CH=CH-(CH}_2\text{)}_7\text{-COOH}$.

Activité 9 *Quelle est la formule générale des triglycérides ?*

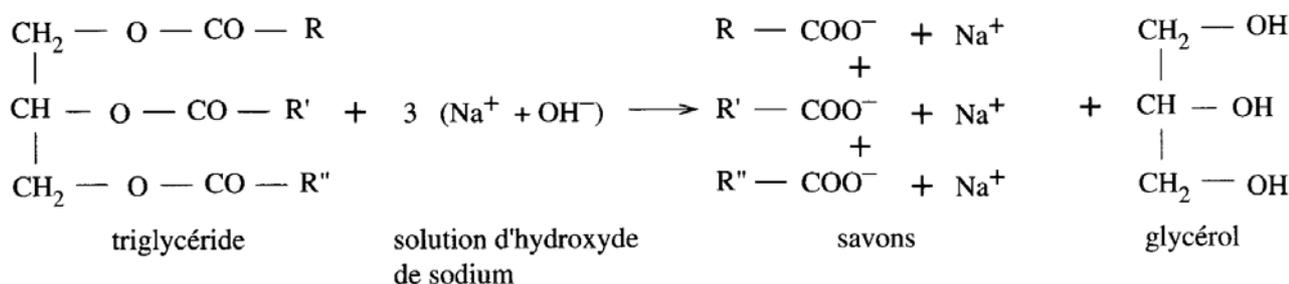
L'équation-bilan de la réaction de synthèse des triglycérides est donc :



Rappelons que les triglycérides sont des esters *naturels*, ce qui limite l'intérêt pratique de la réaction ci-dessus.

② La saponification des triglycérides

La réaction de saponification des triglycérides permet d'obtenir des savons, selon l'équation de réaction :

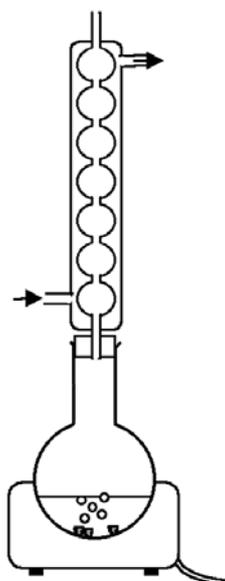


La réaction est lente et *totale*.

L'expérience correspondant à la réaction est la suivante :

Placer dans un ballon, 20 mL d'éthanol, 10 g d'huile et 20 ml de solution d'hydroxyde de sodium à $10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Agiter pour homogénéiser l'ensemble (action de l'éthanol).

Ajouter un réfrigérant à eau et chauffer à ébullition le mélange réactionnel pendant environ 30 minutes tout en l'agitant régulièrement.



Pour faire apparaître le savon, verser le contenu de l'erenmeyer, une fois les 30 minutes écoulées, dans un récipient contenant de l'eau salée.

Le savon, insoluble dans l'eau salée, précipite. Le savon surnage à la surface de l'eau salée.

Cette opération s'appelle le **relargage**.

Dans l'industrie, le savon est séparé par centrifugation. Le glycérol est récupéré lui aussi pour d'autres utilisations industrielles.

C Principe sommaire d'action d'un savon

Un savon est un solide portant le nom de carboxylate de sodium (non général).

Plus précisément, l'équation de la réaction de saponification nous montre que la structure du savon est ionique. Celui-ci est constitué d'ions sodium (ou potassium) et d'ions carboxylate.

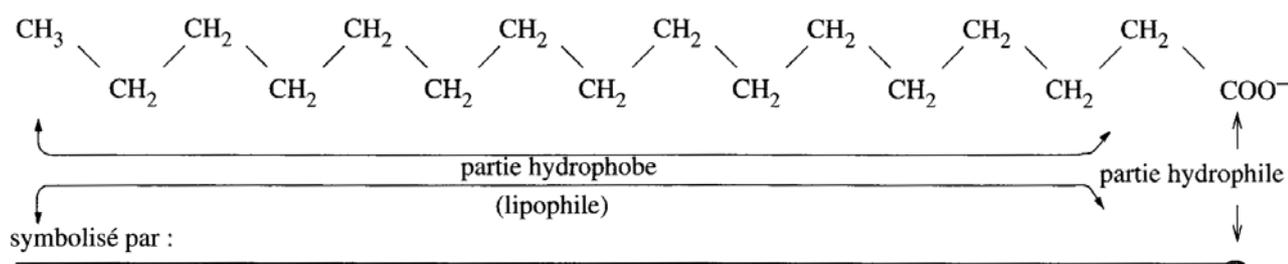
Ce sont ces ions carboxylate qui constituent le principe actif du savon, son action détergente (lavante).

Les ions carboxylate ont une structure que l'on peut séparer en 2 parties :

- ▶ La chaîne carbonée R- provenant de l'acide gras et dont le nombre d'atomes de carbone est en général élevé. Cette partie, issue d'une molécule organique, est insoluble dans l'eau et constitue la partie *hydrophobe* de l'ion carboxylate.
- ▶ Le groupe -COO^- , porteur d'une charge électrique négative, qui est soluble dans l'eau. Il forme la partie *hydrophile* de l'ion carboxylate.

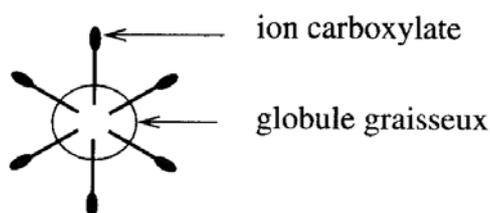
Un ion carboxylate possède donc une partie hydrophile (« attirée » par l'eau) et une partie hydrophobe (ou lipophile) (« attirée » par les molécules organiques).

À partir de l'exemple de l'ion palmitate, il est possible de schématiser un ion carboxylate comme suit :



l'intérêt des savons est, bien entendu, leur action détergente, c'est-à-dire leur capacité à dissoudre dans l'eau des molécules organiques insolubles : les graisses, le sang, la sueur ...

pour cela, les ions carboxylate, grâce à leur partie lipophile, créent des « micelles » : petits globules de graisse entourés d'ions carboxylate, et que l'on peut schématiser ainsi :



On transforme ainsi, grâce aux ions carboxylate, des molécules organiques hydrophobes en molécules dont la surface externe est hydrophile.

En effet, les pôles hydrophiles des ions carboxylate forment une surface qui rend la micelle soluble dans l'eau.

La formation de ces micelles rend possible la dissolution des matières grasses et permet ainsi leur élimination lors du rinçage.

À noter, l'importance du cation métallique dans la formule du carboxylate.

Le carboxylate de sodium, qui constitue la forme principale dans laquelle se trouvent les savons, est très soluble dans l'eau. (C'est en effet une des qualités que l'on demande à un savon pour se laver les mains !).

Les savons sont des agents nettoyants peu efficaces en eaux dures (riches en ions calcium et magnésium). En effet, les ions carboxylate forment avec ces ions Ca^{2+} et Mg^{2+} (ainsi que Fe^{2+}) des sels peu solubles dans l'eau et donc précipitent facilement (auréoles des baignoires, linge rêche).

Importance des conditions expérimentales sur le choix d'une réaction : titrage de l'aspirine

Il est exceptionnel de rencontrer des situations *réelles* où *une seule réaction* chimique est associée à une transformation.

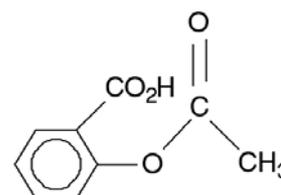
En effet, généralement, un système subissant une transformation est le siège de plusieurs réactions chimiques.

Ce peut être le cas du système constitué initialement d'un mélange aspirine et hydroxyde de sodium.

L'aspirine a pour nom en nomenclature officielle : acide acétylsalicylique et pour formule :

Ce système peut être le siège de 2 réactions :

- ▶ Une réaction acido-basique
- ▶ Une réaction de saponification.



Activité 10 a) Écrire les équations des réactions associées à la transformation.

b) Quelle est la composition qualitative du système lorsque la transformation est terminée ?

Pour chacune de ces réactions, l'avancement maximal est atteint (taux d'avancement final τ égal à 1).

Dans certaines conditions expérimentales, on peut favoriser la réaction acido-basique au détriment de la réaction de saponification ; c'est le cas lorsqu'on travaille à froid et sans excès de solution d'hydroxyde de sodium.

Il est donc possible de procéder au titrage acido-basique d'un comprimé d'Aspirine de masse connue et de vérifier si une seule réaction a bien eu lieu.

A Préparation de la solution d'aspirine

Pour doser l'aspirine dans un comprimé, l'aspirine étant peu soluble dans l'eau, broyer le comprimé soigneusement dans un mortier.

Transvaser la poudre obtenue dans une fiole jaugée de 500 mL. Rincer le mortier et verser l'eau de rinçage dans la fiole. Compléter à 500 mL. Agiter. Éventuellement, placer la fiole sur un agitateur magnétique afin de parfaire la dissolution.

B Le dosage

Prélever 250 mL de la solution d'aspirine, et les mettre dans un bécher. Ajouter quelques gouttes de phénolphtaléine.

Activité 11 Avec quelle verrerie effectuer ce prélèvement ? (voir fiche de verrerie p.9 du fascicule A')

Étalonner le pH-mètre avec les solutions tampons fournies, (pendant la dissolution de la poudre).

Plonger les électrodes du pH-mètre dans la solution.

Titre le contenu du bécher en procédant comme lors du précédent dosage acido-basique (solution de DESTOP).

Arrêter l'addition de soude (volume V_b) quand le pH arrive à 11.

(On utilise de la soude $c_B = 0,10 \text{ mol.L}^{-1}$).

On obtient les résultats suivants :

V_b (mL)	pH	V_b (mL)	pH
0,0	2,99	13,2	4,91
1,0	3,16	13,4	5,11
2,0	3,19	13,6	5,29
3,0	3,34	13,8	5,84
4,0	3,34	14,0	7,61
5,0	3,51	14,2	9,64
6,0	3,64	14,4	10,04
7,0	3,69	14,7	10,29
8,0	3,74	15,0	10,32
9,0	3,91	16,0	10,90
10,0	4,06	17,0	11,01
11,0	4,21	18,0	11,10
12,2	4,44	19,0	11,21
12,5	4,56	20,0	11,31
13,0	4,84		

Activité 12 Tracer la courbe $\text{pH} = f(V_b)$.

Déterminer le volume de soude à l'équivalence $V_{b, \text{éq}}$ en repérant le point équivalent (tracer la fonction dérivée $d\text{pH}/dV_b$).

Activité 13

- Expliquer pourquoi la valeur de $\text{pH}_{\text{éq}}$ est supérieure à 7,0.
- Calculer la masse d'aspirine contenue dans le comprimé.
- Comparer le résultat avec la valeur indiquée sur l'étiquette. (aspirine 500 mg)
- Déterminer graphiquement la valeur du $\text{p}K_A$ du couple acide acétylsalicylique/ion acétylsalicylate.
- À partir d'une valeur du pH obtenu avant l'équivalence, calculer le taux d'avancement final τ de la réaction ; la transformation subie par le système peut-elle être considérée comme totale ?
- Justifier l'utilisation du rouge de crésol comme indicateur de fin de dosage.
Phénolphthaléine : Zone de virage : 7,2-8,8



Conclure

Un autre protocole possible de dosage de l'aspirine est le **dosage indirect**.

Pour cela, il faut broyer un comprimé de 500 mg d'aspirine dans un mortier, puis transvaser la poudre dans un erlenmeyer, rincer le mortier et verser l'eau de rinçage dans l'erlenmeyer. Ajouter un volume $V_0 = 10,0 \text{ mL}$, (mesuré à l'aide d'une pipette), d'une solution d'hydroxyde de sodium à $1,00 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, puis environ 50 mL d'eau distillée.

Puis adapter un réfrigérant à eau sur l'erlenmeyer, fixer l'ensemble à un support et chauffer doucement jusqu'à ébullition pendant une dizaine de minutes.

Rafroidir l'erlenmeyer, puis verser le tout dans une fiole jaugée de volume $V = 100 \text{ mL}$. Rincer l'erlenmeyer, verser l'eau de rinçage dans la fiole et compléter à 100 mL avec de l'eau distillée. Boucher la fiole et la renverser plusieurs fois de manière à homogénéiser le mélange.

Enfin, on dose un volume, prélevé à la pipette, $v = 20,0 \text{ mL}$ de solution contenue dans la fiole par de l'acide chlorhydrique à $0,100 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ dans la burette graduée. On ajoute quelques gouttes de bleu de bromothymol.

On recommence le dosage ; si les mesures s'écartent de plus de $0,3 \text{ mL}$, procède à un 3^{ème} dosage.

On obtient alors $V_{a, \text{éq}} = 9,15 \text{ mL}$.

Activité 14

- 1 Sachant que l'ion hydroxyde réagit avec les fonctions OH et ester de l'acide acétylsalicylique, écrire l'équation de la réaction.
- 2 Calculer la quantité de matière d'ions OH^- présents dans le volume v dosé. En déduire la quantité d'ions OH^- présents dans la fiole de volume V .
- 3 Déterminer la quantité de matière d'ions OH^- ajoutés initialement au comprimé d'aspirine. En déduire la quantité de matière d'ions hydroxyde ayant réagi avec l'acide acétylsalicylique, puis la quantité de matière d'acide acétylsalicylique présent dans le comprimé.
- 4 Calculer la masse d'aspirine contenue dans le comprimé. La comparer à celle indiquée par le fabricant.

Quelle erreur relative (en %) a-t-on fait ?

Activité 15

Montrer, sur cet exemple, en quoi les conditions expérimentales peuvent permettre, lorsque plusieurs réactions chimiques interviennent dans une transformation, d'en privilégier une.

On peut **privilégier** une réaction par rapport à une (des) autre(s) et d'obtenir de façon majoritaire un produit de synthèse donnée.

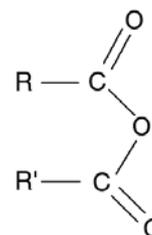
Pour cela, le chimiste devra veiller à respecter les conditions expérimentales appropriées (concentration des réactifs, pH, température, ...) afin de **contrôler** l'évolution du système chimique étudié.

Résumé

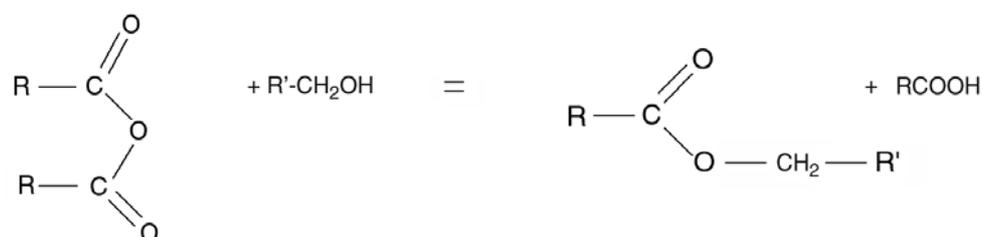
Les anhydrides d'acide sont des composés considérés comme des dérivés d'acides carboxyliques, car ils sont généralement synthétisés à partir des acides carboxyliques.

La formule générale d'un anhydride d'acide est :

Avec R et R' : des groupes alkyle (ou autre)



L'équation de la réaction entre un anhydride d'acide et un alcool est :



Cette transformation, qui se fait à température modérée, est **moins lente** que celle faisant intervenir l'acide carboxylique correspondant, et est, de plus, **totale (avancement maximal atteint)**.

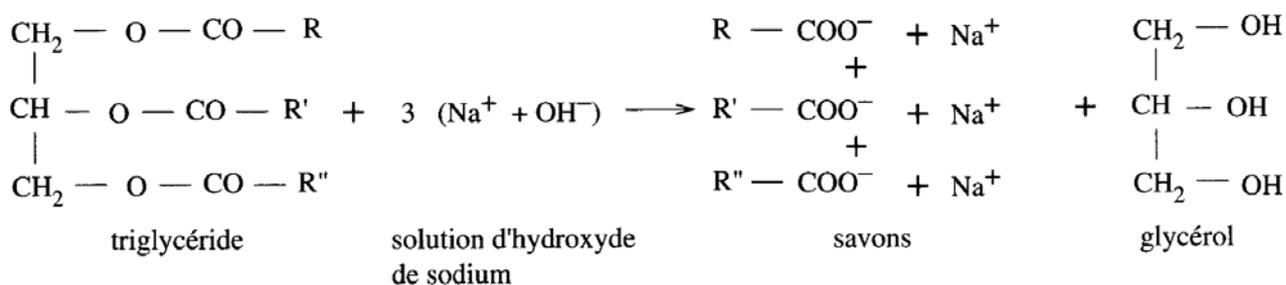
L'équation-bilan de la réaction **d'hydrolyse basique d'un ester** s'écrit :



Le milieu étant basique, l'acide carboxylique est obtenu sous la forme de sa base conjuguée : l'ion carboxylate.

Ainsi, la réaction d'hydrolyse d'un ester est limitée et lente, la réaction de saponification d'un ester est *lente et totale*.

La réaction de **saponification des triglycérides** permet d'obtenir des savons, selon l'équation de réaction :



La réaction est lente et *totale*.

Un savon est un solide portant le nom de carboxylate de sodium (non général).

Les ions carboxylate ont une structure que l'on peut séparer en 2 parties :

► La chaîne carbonée R- provenant de l'acide gras et dont le nombre d'atomes de carbone est en général élevé. Cette partie, issue d'une molécule organique, est insoluble dans l'eau et constitue la partie *hydrophobe* de l'ion carboxylate.

► Le groupe -COO^- , porteur d'une charge électrique négative, qui est soluble dans l'eau. Il forme la partie *hydrophile* de l'ion carboxylate.

Un ion carboxylate possède donc une partie hydrophile (« attirée » par l'eau) et une partie hydrophobe (ou lipophile) (« attirée » par les molécules organiques).

On transforme ainsi, grâce aux ions carboxylate, des molécules organiques hydrophobes en molécules dont la surface externe est hydrophile.

En effet, les pôles hydrophiles des ions carboxylate forment une surface qui rend la micelle soluble dans l'eau.

La formation de ces micelles rend possible la dissolution des matières grasses et permet ainsi leur élimination lors du rinçage.

Il est exceptionnel de rencontrer des situations *réelles* où **une seule réaction** chimique est associée à une transformation.

En effet, généralement, un système subissant une transformation est le siège de plusieurs réactions chimiques.

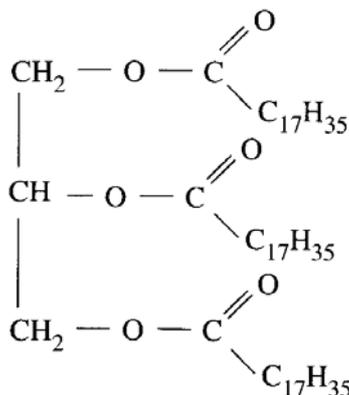
On peut **privilégier** une réaction par rapport à une (des) autre(s) et d'obtenir de façon majoritaire un produit de synthèse donné.

Pour cela, le chimiste devra veiller à respecter les conditions expérimentales appropriées (concentration des réactifs, pH, température, ...) afin de **contrôler** l'évolution du système chimique étudié.

Exercices d'applications

Exercice ① Synthèse de la stéarine

Le glycérol ou propanetriol est fabriqué par saponification des huiles ou des graisses. Parmi ces dernières la stéarine a pour formule :



- ① Écrire l'équation générale d'une réaction de saponification en précisant les noms des réactifs et ceux des produits de la réaction. Celle-ci est-elle totale ? Est-elle rapide ?
- ② Écrire l'équation-bilan de la réaction qui permet d'obtenir le glycérol à partir de la stéarine.

Exercice ② Réaction de saponification

Dans les conditions expérimentales convenables, un alcool secondaire à 4 atomes de carbone noté A réagit avec un acide carboxylique D ; cette réaction est notée (1). Le produit organique obtenu par la réaction (1) est additionné de soude concentrée et le mélange est chauffé. Par cette réaction, notée (2), on obtient alors à nouveau l'alcool A et un composé ionique E de masse molaire $M = 82 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

- ① Quel est le composé ionique E ?
- ② Déterminer la formule semi-développée de D ; quel est le nom de D ?
- ③ Écrire l'équation de la réaction (1).
- ④ Écrire l'équation de la réaction (2). Comment appelle-t-on ce type de réaction ?

On donne : $M_{\text{Na}} = 23,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$; $M_{\text{C}} = 12,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$; $M_{\text{O}} = 16,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$; $M_{\text{H}} = 1,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Exercices type bac

Exercice ③ Synthèse de la butyrine

Les parties 1 et 2 peuvent être traitées indépendamment.

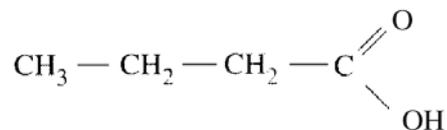
Préambule

Les lipides sont des esters d'acides gras ; ils forment la majeure partie des huiles et graisses animales et végétales.

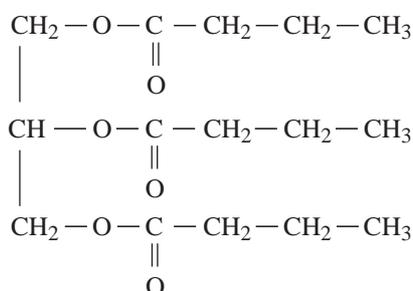
Ils peuvent être préparés par réaction d'estérification entre un alcool et un acide carboxylique à longue chaîne carbonée appelé acide gras.

Questions

- ❶ L'acide butyrique est un acide gras de formule.



- a) Donner le nom de cet acide en utilisant la nomenclature officielle. Identifier son groupe fonctionnel.
- b) Écrire l'équation de la réaction chimique entre l'acide butyrique et le propan-1-ol. Nommer les produits de la réaction.
- c) Quelles sont les caractéristiques de cette réaction ?
- ❷ La butyrine est un corps gras présent dans le beurre. Elle peut être considérée comme résultant de la réaction entre le glycérol ou propan-1, 2, 3-triol et l'acide butyrique. Sa formule semi-développée est :



- a) Entourer et nommer les groupes fonctionnels dans cette molécule.
- b) On fait réagir, à chaud, une solution d'hydroxyde de sodium (soude) en excès sur la butyrine. Écrire l'équation de la réaction. Quel nom donne-t-on à cette réaction ? Nommer les produits obtenus.
- c) Après refroidissement, on verse le milieu réactionnel dans une solution saturée de chlorure de sodium. Il y a formation d'un solide appelé savon.

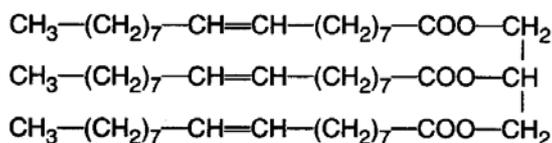
Donner la formule de ce savon.

- d) Quelle masse de savon peut-on fabriquer, au maximum, à partir de 30,2 g de butyrine ?

Données : masse molaire M_1 de la butyrine : $302 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$; M_2 du savon : $110 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

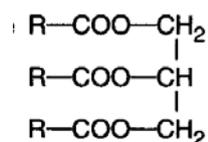
Exercice 4 Indice de saponification

- ❶ On étudie l'estérification du butan-1-ol et de l'acide éthanoïque.
- a) Écrire l'équation de la réaction. Nommer l'ester formé.
- b) On réalise la réaction de saponification de l'ester obtenu par l'hydroxyde de sodium (soude). Écrire l'équation de la réaction.
- ❷ On considère un corps gras ne contenant qu'un seul type de triglycéride, l'oléine, de formule :



et de masse molaire 884 g/mol .

L'oléine sera notée :



a) L'oléine est un triester du glycérol et de l'acide oléique. Écrire les formules semi-développées du glycérol et de l'acide oléique.

b) Ce corps gras est caractérisé par son indice de saponification qui est, en première approche, la masse en milligrammes d'hydroxyde de potassium ou potasse KOH nécessaire pour saponifier le triester contenu dans 1 g de matière grasse.

Écrire l'équation de la réaction de saponification de l'oléine par la potasse.

Pour quelle raison cette réaction porte-t-elle ce nom ?

c) L'indice de saponification de ce corps gras est 156.

Quel est le pourcentage en masse d'oléine dans le corps gras envisagé ?

On donne les masses molaires : (en $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$) : $\text{K} = 39$; $\text{O} = 16$; $\text{C} = 12$; $\text{H} = 1$

Exercice 5 Synthèse de l'aspirine

On prépare l'aspirine en faisant réagir de l'acide salicylique (acide 2-hydroxybenzoïque) avec de l'anhydride acétique.

On ajoute quelques gouttes d'acide sulfurique concentré.

1) Quel est le rôle de l'acide sulfurique ? Pourquoi utilise-t-on de l'anhydride acétique plutôt que de l'acide acétique ? Quelles précautions faut-il prendre lors de la manipulation des différents produits chimiques ?

L'aspirine brute est lavée à l'eau froide puis recristallisée dans un mélange eau éthanol.

2) Justifier l'utilisation de l'eau froide. Donner le principe de la recristallisation.

Dosage d'un comprimé d'aspirine « 500 »

On prépare une solution S_1 d'hydroxyde de sodium de concentration voisine de 0,1 mol/L à partir d'une solution commerciale (densité 1,33 ; % massique en soude 33 % ; masse molaire $\text{NaOH} = 40$ g/mol).

3) Indiquer le mode opératoire permettant de préparer 250 mL de S_1 .

On dissout un comprimé aspirine « 500 » dans 500 mL d'eau : solution S_2 . On dose 250 mL de S_2 par la solution de soude S_1 ($c = 0,098$ mol/L). Le volume équivalent est 14 mL et pH à l'équivalence est voisin de 8.

4) Déterminer la masse d'aspirine contenue dans un comprimé et justifier l'appellation aspirine « 500 » (masse molaire aspirine 180 g/mol).

5) L'équivalence du dosage aurait pu être appréciée à l'aide d'un indicateur coloré. Préciser lequel ?

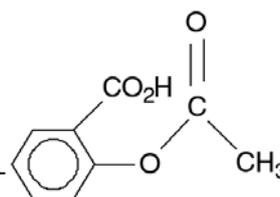
bleu de bromophénol [3 ; 4,6] ; bleu de bromothymol [6 ; 7,6] ; rouge de phénol [6,4 ; 8,2] ; phénolphthaléine [8 ; 9,8]

Exercice 6 Dosage d'un comprimé d'aspirine

I. Étude théorique

1) a) L'aspirine ou acide acétylsalicylique a pour formule :

Reproduire la formule, encadrer et nommer les deux groupes fonctionnels de l'aspirine.



b) Écrire l'équation de la réaction (notée 1) ayant lieu à 25 °C entre un acide de formule RCOOH et une solution aqueuse de soude (hydroxyde de sodium en solution aqueuse).

c) Écrire l'équation de la réaction totale (notée 2) ayant lieu à chaud entre un ester R_1COOR_2 et une solution aqueuse de soude. Quel est le nom donné à cette réaction ?

II. Étude expérimentale

On se propose de vérifier le dosage d'un comprimé d'aspirine 500 (500 mg d'aspirine annoncé par comprimé). Pour cela on utilise le protocole expérimental suivant :

Première étape

Un comprimé d'aspirine 500 est placé dans un erlenmeyer. On ajoute 10,0 mL d'une solution aqueuse de soude de concentration $1,0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et environ 20 mL d'eau. Soit S_1 la solution obtenue. L'ensemble est chauffé au voisinage de l'ébullition pendant 10 minutes.

Deuxième étape

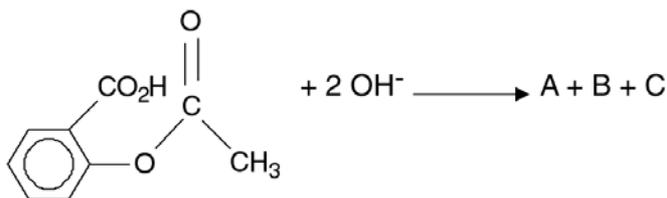
Après refroidissement, la solution limpide obtenue est versée dans une fiole jaugée de 250 mL. De l'eau distillée est versée jusqu'au trait de jauge. Soit S_2 la solution obtenue.

Troisième étape

À l'aide d'une pipette jaugée, on prélève 20,0 mL de la solution S_2 que l'on verse dans un erlenmeyer. On ajoute quelques gouttes de phénolphaléine, la solution est rose violacé.

On effectue un dosage des ions HO^- de S_2 par une solution d'acide chlorhydrique de concentration $5,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. La décoloration s'observe pour 7,2 mL de solution acide versée.

2 a) En admettant qu'à la fin de la première étape, seules les réactions (1) et (2) se sont produites, l'équation de la réaction globale (notée 3) entre l'aspirine et la solution aqueuse de soude s'écrit :



Donner les formules semi-développées des produits A, B et C.

b) Calculer :

– la quantité de matière (en moles) n_1 d'ions HO^- ajoutés au comprimé d'aspirine dans la première étape ;

– la quantité de matière n_2 d'ions HO^- dosés par l'acide chlorhydrique dans la troisième étape ; on déduire la quantité de matière n_3 d'ions HO^- restant dans la fiole jaugée de 250 mL dans la deuxième étape ;

– la quantité de matière n d'ions HO^- ayant réagi selon la réaction (3) avec l'aspirine dans la première étape.

c) En déduire la quantité de matière d'acide acétylsalicylique ayant réagi selon la réaction (3) et déterminer la masse d'acide acétylsalicylique contenue dans un comprimé dosé (masse molaire de l'acide acétylsalicylique : $180 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$).

d) Le laboratoire pharmaceutique fabriquant le comprimé étudié s'impose un écart maximum de 5 % sur la masse de principe actif contenu dans un comprimé d'aspirine 500. Le résultat trouvé répond-il à la norme de fabrication ? ■

Séquence

10

> **Physique :**

La lumière et le temps

> **Chimie :**

**Contrôle de l'évolution
d'un système par utilisation
de la catalyse**

Sommaire

Séquence 10

Physique > La lumière et le temps

Chapitre 1	>	Aspect ondulatoire de la lumière	359
		A Diffraction	
		B Dispersion de la lumière	
Chapitre 2	>	Aspect corpusculaire de la lumière	363
		A Limites de la mécanique newtonienne	
		B Quantification des niveaux d'énergie	
		C Spectres atomiques	
		D Spectres moléculaires, spectres nucléaires	
		E Le photon	
Chapitre 3	>	La mesure du temps et ses applications	366
		A La mesure du temps	
		B Applications des mesures de durée	
Résumé	>	.....	367
Exercices	>	.....	368

Chimie > Contrôle de l'évolution d'un système par utilisation de la catalyse

Chapitre 1	>	Mise en évidence du phénomène de catalyse	.....	377
Chapitre 2	>	Catalyse homogène	.....	378
Chapitre 3	>	Catalyse hétérogène	.....	379
Chapitre 4	>	Catalyse enzymatique	.....	380
Chapitre 5	>	Sélectivité des catalyseurs	.....	381
Chapitre 6	>	Application de la catalyse	.....	382
Résumé	>		.....	383
Exercices	>		.....	384

Physique

Objectifs

- ▶ Exploiter une figure de diffraction en utilisant la relation : $\theta = \frac{\lambda}{a}$.
- ▶ Savoir que, étant diffractée, la lumière peut être considérée comme une onde. Connaître les limites des longueurs d'onde dans le vide du spectre visible.
- ▶ Savoir que les milieux transparents sont plus ou moins dispersifs et connaître la définition de l'indice d'un milieu transparent pour une fréquence donnée.
- ▶ Savoir que les niveaux d'énergie des systèmes microscopiques sont quantifiés et savoir calculer la longueur d'onde de la radiation émise lors d'une transition entre deux niveaux.
- ▶ Connaître des exemples de phénomènes physiques permettant la mesure des durées et savoir utiliser la mesure d'une durée pour déterminer une longueur ou une vitesse.

A Diffraction

1 Généralités

Nous avons vu dans le chapitre 1 que les ondes progressives subissent un phénomène appelé diffraction lorsqu'elles rencontrent un obstacle ou lorsqu'elles traversent une ouverture. Nous allons préciser l'allure d'une figure de diffraction à l'aide des schémas de la figure 1 ci-dessous :

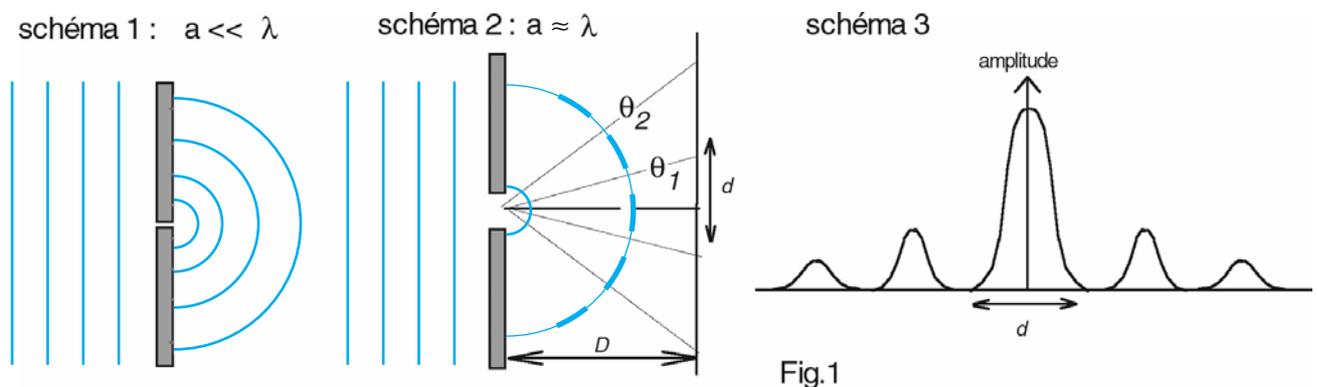


Fig.1

Considérons une onde plane, de longueur d'onde λ , qui traverse une fente rectangulaire de largeur a .

- ▶ Si a est beaucoup plus grand que λ , le phénomène de diffraction ne s'observe qu'au voisinage des bords de la fente.
- ▶ Si a est très petit par rapport à λ , l'onde diffractée est une onde sphérique, centrée sur l'ouverture et son amplitude est constante (schéma 1).
- ▶ Si a est du même ordre de grandeur que λ , l'amplitude de l'onde diffractée n'est pas constante : pour chaque valeur (exprimée en radian) de l'angle θ telle que $\theta = n \frac{\lambda}{a}$ où n est un nombre entier, l'amplitude est nulle. Si bien que l'onde représentée sur le schéma 2 a une amplitude variable, qui s'annule pour certaines valeurs telles que $\theta_1, \theta_2 \dots$. On a d'ailleurs représenté, sur le schéma 3, l'amplitude de l'onde en différents points d'un segment AB situé à une distance D de la fente (perpendiculairement à la médiatrice de la fente).

Activité 1

Une onde sonore plane de fréquence 500 Hz, se propageant dans l'air où la célérité du son vaut $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, rencontre une fente verticale de très grande hauteur et de largeur horizontale a . Donner une estimation de la valeur de a pour que l'onde sonore, élargie à la sortie de la fente par le phénomène de diffraction, soit assimilable à une onde sphérique d'amplitude constante.

2 Diffraction de la lumière

Le phénomène de diffraction par une ouverture s'observe aussi, tel qu'il a été décrit dans le paragraphe précédent, pour la lumière. Ce comportement de la lumière ne peut s'expliquer qu'en attribuant à la lumière une nature ondulatoire : une radiation lumineuse monochromatique (c'est-à-dire d'une seule couleur) est assimilée à une onde, de longueur d'onde λ qui se propage dans l'air et dans le vide avec une vitesse $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

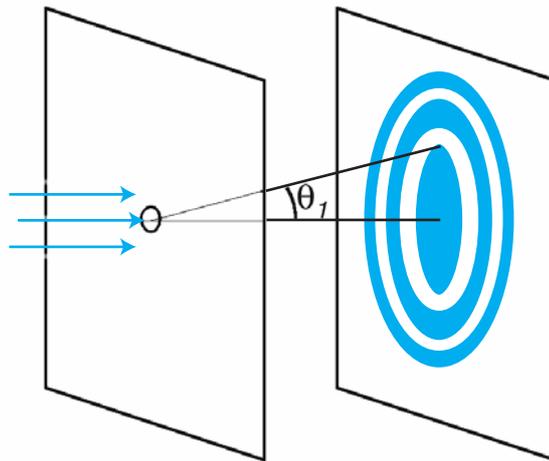


Fig. 2

► On constate ainsi que la lumière traversant une fente de largeur a , du même ordre de grandeur que λ , donne sur un écran des franges de diffraction semblables au schéma 3 de la figure 1.

Si on note d la longueur de la frange centrale lumineuse et D la distance entre la fente et l'écran d'observation, $\tan \theta_1 = \frac{d/2}{D}$. Nous admettrons, par la suite, que les angles que nous aurons à considérer sont suffisamment faibles pour qu'on puisse écrire : $\tan \theta_1 \approx \theta_1$ (valeur de l'angle exprimée en radian), si bien que la longueur de la frange centrale lumineuse est donnée par : $d = \frac{2D\lambda}{a}$.

Le même phénomène de diffraction s'observe (fig. 2) lorsque la lumière traverse une fente circulaire de diamètre a : la figure de diffraction observée sur l'écran est alors une tache lumineuse circulaire de diamètre $d = \frac{2D\lambda}{a}$ que l'on appelle « tache d'Airy » entourée d'anneaux circulaires moins lumineux.

► La diffraction de la lumière peut aussi être observée en éclairant, non plus une fente mais un obstacle : avec un fil rectiligne mince (cheveu par exemple), on observe la même image de diffraction qu'avec une fente de largeur égale à l'épaisseur du fil et avec un petit grain circulaire, on observe la même image de diffraction qu'avec une fente circulaire de même diamètre.

Dans le cas d'un obstacle de grande dimension, on observe quelques raies brillantes dans l'ombre de l'objet, ces raies sont parallèles au bord de l'objet et très proches sur l'écran de la limite entre l'ombre et la lumière.

Activité 2 On éclaire avec une radiation monochromatique de couleur verte une petite ouverture circulaire de diamètre $a = 0,50 \text{ mm}$. La tache d'Airy, observée sur un écran situé à $1,00 \text{ m}$ de l'ouverture a un diamètre de $2,1 \text{ mm}$. En déduire la longueur d'onde de la radiation lumineuse observée.

B Dispersion de la lumière

1 Longueur d'onde dans le vide

Chaque radiation lumineuse monochromatique est caractérisée par sa fréquence ν (il s'agit en fait de la fréquence de vibration du champ électromagnétique associé à la propagation de la lumière).

Dans le vide, la célérité de la lumière vaut $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et la longueur d'onde se déduit de la fréquence par la relation : $\lambda = \frac{c}{\nu}$. Le tableau ci-dessous indique en nanomètre ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) les longueurs d'onde dans le vide correspondant aux principales couleurs.

Un rayonnement lumineux est dit polychromatique lorsqu'il est constitué de plusieurs radiations monochromatiques.

On appelle lumière blanche, une émission lumineuse comportant toutes les longueurs d'onde de la lumière visible (par exemple, le rayonnement solaire ou la lumière émise par une lampe à incandescence). Il faut également savoir, que les radiations infrarouges ont une longueur d'onde dans le vide supérieure à 800 nm et que les radiations ultraviolettes ont une longueur d'onde dans le vide inférieure à 400 nm.

longueur d'onde (en nm)	400 à 430	440 à 480	490 à 540	550 à 570	580 à 600	650 à 800
couleur	violet	bleu	vert	jaune	orange	rouge

2 Longueur d'onde dans un milieu transparent autre que le vide

La fréquence d'une radiation lumineuse est constante, elle ne dépend pas du milieu de propagation.

En revanche, la vitesse V de la lumière dépend du milieu. On note n et on appelle indice de réfraction d'un milieu le rapport $n = \frac{c}{V}$ dans lequel c est la vitesse de propagation dans le vide.

L'indice de réfraction est toujours supérieur à 1, mais dans le cas de l'air, il est si proche de 1 qu'on peut assimiler la vitesse de propagation d'une onde lumineuse dans l'air à c .

Lorsqu'une même radiation change de milieu de propagation, sa fréquence reste la même mais sa longueur d'onde change.

Activité 3 Une radiation jaune a pour longueur d'onde dans le vide $\lambda = 560 \text{ nm}$. Calculer sa fréquence et déterminer la longueur d'onde de cette radiation lorsqu'elle se propage dans le verre d'indice $n = 1,50$.

3 Réfraction d'un rayon lumineux

Lorsqu'un rayon lumineux change de milieu de propagation, il subit un changement de direction : ce phénomène est appelé réfraction.

Ainsi, si le rayon lumineux incident fait, dans le premier milieu d'indice n_1 , un angle i_1 par rapport à la normale (droite perpendiculaire à la surface de séparation), il fera, dans le second milieu d'indice n_2 , un angle d'incidence i_2 avec cette normale.

Le rayon incident, la normale et l'angle réfracté sont dans le même plan appelé plan d'incidence et les angles i_1 et i_2 vérifient la relation de Snell-Descartes : $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$.

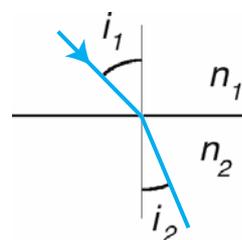


Fig. 3

Activité 4 Dans quel cas, un rayon lumineux qui passe de l'air dans le verre ne subit-il aucun changement de direction ?

4 Milieu dispersifs

Un milieu est dit « dispersif », si la vitesse de propagation de l'onde dépend de la fréquence. Dans un milieu dispersif, les différentes couleurs de la lumière blanche ne se propagent pas à la même vitesse, ce qui signifie que l'indice de réfraction n'est pas le même pour toutes les couleurs.

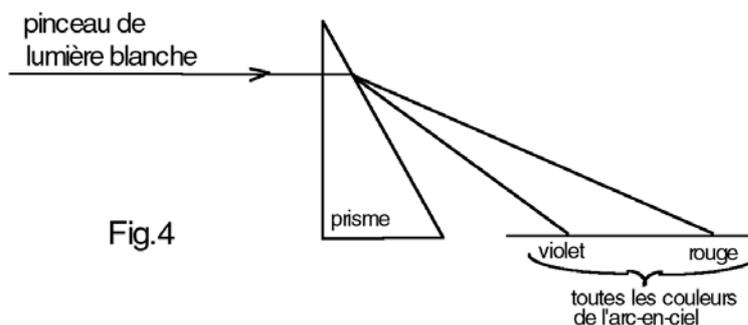


Fig.4

Le verre, contrairement à l'air et au vide, est un milieu dispersif si bien qu'à chaque couleur du spectre visible, correspond une valeur différente de l'indice du verre.

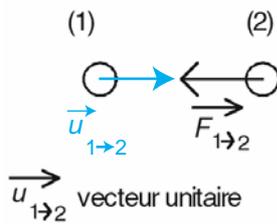
Si un rayonnement polychromatique (fig. 3) arrive sur le bloc de verre, les différentes radiations monochromatiques se sépareront après passage dans le prisme : on explique ainsi la décomposition de la lumière blanche par un prisme.

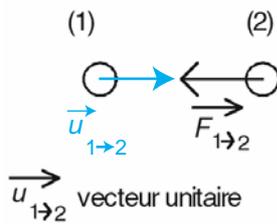
Activité 5 *Indiquer, à l'aide du schéma de la figure 3, comment varie l'indice de réfraction du verre en fonction de la longueur d'onde.*

A Limites de la mécanique newtonienne

Nous avons vu, dans les chapitres précédents, que l'application de la mécanique newtonienne aux planètes et satellites permettait de retrouver les résultats observés expérimentalement : À partir de l'expression de la force de gravitation, on peut ainsi démontrer les lois de Kepler.

Il est donc tentant d'appliquer les lois de la mécanique newtonienne aux électrons situés autour du noyau de l'atome, d'autant plus que l'expression de la force électrostatique s'exerçant entre deux particules chargées présente des analogies avec l'expression de la force gravitationnelle entre ces deux particules :

(1) 

(2) 

$\vec{u}_{1 \rightarrow 2}$ vecteur unitaire

Force d'interaction gravitationnelle entre deux particules :
 G est la constante de gravitation universelle

Force d'interaction électrostatique entre deux particules :
 k est la constante d'interaction électrostatique

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{u}_{1 \rightarrow 2}$$

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{u}_{1 \rightarrow 2}$$

Toutefois, l'application des lois de la mécanique newtonienne aux électrons soumis à l'attraction électrostatique du noyau donne des résultats en contradiction avec l'expérience.

En effet, de même qu'il est possible de placer un satellite sur une orbite circulaire d'altitude quelconque (donc d'énergie quelconque), l'application de la mécanique classique aux atomes indiquerait que ceux-ci peuvent avoir une énergie quelconque (selon la distance entre les électrons et le noyau).

Mais les résultats expérimentaux sont en désaccord avec cette indication : ils montrent au contraire que l'énergie d'un atome constitué d'électrons entourant le noyau ne peut prendre que quelques valeurs bien précises (ce qui explique l'identité surprenante des systèmes atomiques par opposition à la grande variété des systèmes planétaires).

Pour interpréter ces résultats expérimentaux concernant l'atome (et d'une façon générale tous les systèmes microscopiques : molécules, atomes, noyaux), il a fallu construire une nouvelle mécanique : la mécanique quantique, basée sur la discontinuité des niveaux d'énergie.

B Quantification des niveaux d'énergie

Considérons le système dont les niveaux d'énergie sont représentés sur la figure 5. Le plus bas niveau d'énergie, noté E_1 , est le niveau fondamental, les autres niveaux sont appelés niveaux excités.

Supposons que l'énergie du système à un moment donné soit E_1 . Pour faire passer le système au niveau 2 (qui est le premier niveau excité), il faut lui apporter exactement l'énergie $E_2 - E_1$.

Ceci peut être réalisé lors de collisions entre notre système et des particules en mouvement, mais ceci peut également être obtenu par absorption d'énergie lumineuse : Si notre système est éclairé par une radiation monochromatique de fréquence ν , il pourra absorber de l'énergie et accéder ainsi au premier niveau excité mais ceci ne se produit que si la fréquence ν de la lumière absorbée vérifie la relation :

$$E_2 - E_1 = h\nu$$

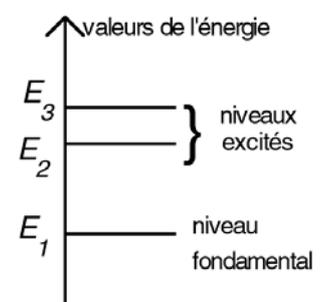


Fig. 5

Dans cette relation, h est une constante, appelée constante de Planck : $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

L'atome se trouvant sur le premier niveau excité, peut ensuite revenir sur son niveau fondamental en perdant l'énergie excédentaire : il émet alors un rayonnement de fréquence ν vérifiant $E_2 - E_1 = h\nu$.

Ceci explique que les longueurs d'onde du rayonnement émis aient les mêmes valeurs que les longueurs d'onde du rayonnement absorbé.

Remarque : *du fait des conventions choisies pour l'énergie potentielle, les niveaux d'énergie sont généralement exprimés avec des valeurs négatives.*

C Spectres atomiques

Une lampe spectrale est constituée d'une ampoule contenant un gaz sous faible pression et munie de deux électrodes. L'établissement d'une haute tension entre les deux électrodes permet de communiquer de l'énergie aux atomes du gaz par un mécanisme que nous ne détaillerons pas (chocs entre ions et atomes neutres).

Les atomes ayant ainsi acquis de l'énergie se trouvent dans des états excités d'où ils retombent en émettant de la lumière. Comme les niveaux d'énergie sont discrets (ce qui signifie qu'il n'en existe que quelques uns), le rayonnement émis par la lampe ne contient que quelques radiations monochromatiques. L'analyse de ce rayonnement par un prisme fournit un spectre bien différent de celui obtenu avec une lampe à incandescence : il ne contient que quelques couleurs bien précises alors que le spectre de la lumière blanche est continu : il contient toutes les couleurs.

Le spectre de l'hydrogène, par exemple, a l'allure représentée ci-dessous, mais il faut imaginer, à la place de chaque trait, une raie colorée (on a indiqué, sous le spectre, la longueur d'onde et la couleur de chaque raie).



Activité 6 Calculer, en Joule, la différence d'énergie entre le niveau initial et le niveau final lors de la transition pour laquelle le mercure émet un rayonnement visible rouge de longueur d'onde dans le vide 656 nm.

D Spectres moléculaires, spectres nucléaires

Ce que nous venons de dire pour les atomes est vrai pour tout autre système microscopique : il existe des niveaux d'énergie et le système peut accéder à des niveaux d'énergie plus élevés en absorbant de l'énergie ou retomber à des niveaux d'énergie inférieurs en restituant de l'énergie sous forme de rayonnement.

Comme le Joule est une unité d'énergie qui convient pour les phénomènes à notre échelle, elle n'est pas adaptée aux phénomènes microscopiques pour lesquels on préfère utiliser une autre unité d'énergie : l'électron-volt (symbole eV) qui vaut : $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

On utilise aussi le kilo électron-volt : $1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$ et le méga électron-volt : $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$.

Ainsi, les niveaux d'énergie d'un atome sont situés à quelques eV les uns des autres, ce qui conduit à l'émission ou l'absorption de rayonnements visibles ou proches du visibles.

Dans une molécule, les niveaux d'énergie ne sont situés qu'à quelques centièmes d'électron-volt les uns des autres, ce qui conduit à l'émission ou l'absorption de rayonnements dont la longueur d'onde est de l'ordre du centimètre (appelés rayonnements micro-onde).

Dans un noyau, les niveaux d'énergie sont situés à plusieurs dixièmes de méga électron-volt les uns des autres, ce qui conduit à l'émission ou l'absorption de rayonnements extrêmement énergétiques : les rayons γ .

Activité 7

Calculer la longueur d'onde dans le vide du rayonnement émis lors d'une transition entre deux niveaux d'énergie atomiques distants de 2,0 eV ; entre deux niveaux d'énergie moléculaire distants de 0,2 eV ; entre deux niveaux d'énergie nucléaires distants de 0,2 MeV.

E Le photon

Chaque transition entre deux niveaux d'énergie s'accompagne donc de l'émission ou de l'absorption d'un rayonnement transportant juste l'énergie nécessaire : ceci suggère que l'énergie lumineuse soit transportée, dans le rayonnement, sous forme de « grains d'énergie » appelés aussi quanta d'énergie ou photons (c'est-à-dire particules de lumière).

Il existe ainsi, à la différence des expériences de diffraction, un certain nombre de phénomènes ne pouvant être interprétés qu'en attribuant à la lumière une nature corpusculaire, c'est-à-dire en admettant que l'énergie de la lumière se trouve condensée en grains d'énergie (ou photons).

Quel que soit le référentiel considéré, les photons se déplacent avec une vitesse égale à la célérité de la lumière dans le vide : $c = 300\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

Le photon est une particule de charge nulle et de masse nulle.

L'énergie du photon, proportionnelle à la fréquence de la radiation à laquelle il appartient, prend des valeurs très différentes selon la nature de cette radiation comme le montre le tableau ci-dessous dans lequel l'énergie est exprimée en électron-volt.

Dénomination	Longueur d'onde dans le vide	Énergie (en eV)
ondes hertziennes	supérieure à 1 mm	inférieure à 10^{-3} eV
infra-rouge	de 1 mm à 800 nm	de 10^{-3} eV à 1,6 eV
visible	de 800 nm à 400 nm	de 1,6 eV à 3,1 eV
ultra-violet	de 400 nm à 10 nm	de quelques eV à 100 eV
rayons X	de 10 nm à 10 pm	de 100 eV à 100 keV
rayons γ	moins de 10 pm	plus de 0,1 MeV

Activité 8

Combien faut-il de photons appartenant à une radiation jaune de longueur d'onde 590 nm pour transporter autant d'énergie qu'un seul photon γ d'énergie 0,5 MeV ?

A

La mesure du temps

Nous avons, dans les chapitres précédents, étudié des systèmes évoluant de façons très différentes au fil du temps :

► Dans certains cas, il y a décroissance au fil du temps d'une grandeur associée au phénomène : ainsi l'activité d'une source radioactive ou la tension aux bornes d'un condensateur qui se décharge dans une résistance.

Ces phénomènes peuvent permettre de mesurer une durée, par exemple la durée nécessaire pour que la grandeur ne vaille plus que la moitié de sa valeur initiale (demi-vie d'une source radioactive). De même, certains « sabliers électroniques » reposent sur la décharge d'un condensateur dans une résistance.

► Dans d'autres cas, un mouvement se reproduit identique à lui-même aux cours d'intervalles de temps constants appelés périodes (mouvement de la terre autour du Soleil, rotation de la terre sur elle-même, balancier d'une horloge). De tels phénomènes peuvent également permettre de mesurer des durées en comptant le nombre de périodes écoulées. Ainsi, les montres à quartz décomptent le nombre de périodes d'une tension alternative (variant de façon semblable à la tension aux bornes d'un condensateur relié à une bobine de résistance négligeable).

La définition actuelle de la seconde est basée sur la période du rayonnement émis par le césium lors d'une transition entre deux niveaux d'énergie bien définis.

B

Applications des mesures de durée

La mesure d'une durée peut être utilisée pour déterminer une longueur ou une vitesse. Ces applications, qui ne nécessitent aucune connaissance théorique nouvelle, sont développées dans les exercices 10 à 14.

Résumé

► Une onde plane, de longueur d'onde λ , qui traverse une fente rectangulaire de largeur a subit un phénomène appelé diffraction

– Si $a \gg \lambda$, le phénomène de diffraction ne s'observe qu'au voisinage des bords de la fente

– Si $a \ll \lambda$, l'onde diffractée est une onde sphérique d'amplitude constante

Si a est du même ordre de grandeur que λ , l'amplitude de l'onde diffractée n'est pas constante : pour chaque valeur de l'angle θ , exprimée en radian telle que $\theta = n \frac{\lambda}{a}$ où n est un nombre entier, l'amplitude est nulle. Si on note d la longueur de la frange centrale lumineuse et D la distance entre la fente et l'écran d'observation, la longueur de la frange centrale lumineuse est approximativement donnée par : $d = \frac{2D\lambda}{a}$.

Le même phénomène de diffraction s'observe lorsque la lumière traverse une fente circulaire de diamètre a : la figure de diffraction observée sur l'écran est alors une tache lumineuse circulaire de diamètre $d = \frac{2D\lambda}{a}$ que l'on appelle « tache d'Airy » entourée d'anneaux circulaires moins lumineux.

► Longueur d'onde d'un rayonnement monochromatique de fréquence ν dans le vide : $\lambda = \frac{c}{\nu}$ et dans un milieu transparent d'indice n : $\lambda' = \frac{V}{\nu}$ en notant respectivement c et V la vitesse de la lumière dans le vide et dans le milieu transparent. L'indice de réfraction du milieu est le rapport $n = \frac{c}{V}$.

Dans un milieu dispersif, la valeur de l'indice est différente selon la fréquence de la radiation étudiée.

► Un système microscopique (noyau, atome, molécule...) est caractérisé par des niveaux d'énergie discrets : l'énergie ne peut prendre que quelques valeurs bien précises).

Si le système est dans le niveau d'énergie E_1 , il pourra accéder au niveau d'énergie E_2 en absorbant de l'énergie lors de collision ou en absorbant l'énergie apportée par une radiation monochromatique de fréquence ν vérifiant la relation : $E_2 - E_1 = h\nu$.

Lors d'une transition du niveau E_2 au niveau E_1 , le système émettra une radiation monochromatique ayant cette même fréquence ν .

► Un électron-volt (symbole eV) vaut : $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; $1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$ et $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$.

Les niveaux d'énergie d'un atome sont situés à quelques eV les uns des autres alors que les niveaux d'énergie dans le noyau sont situés à quelques dixièmes de MeV les uns des autres.

► Pour mesurer une durée, on peut utiliser la décroissance d'une grandeur au cours du temps (activité d'une source radioactive par exemple) ou la répétition d'un phénomène périodique.

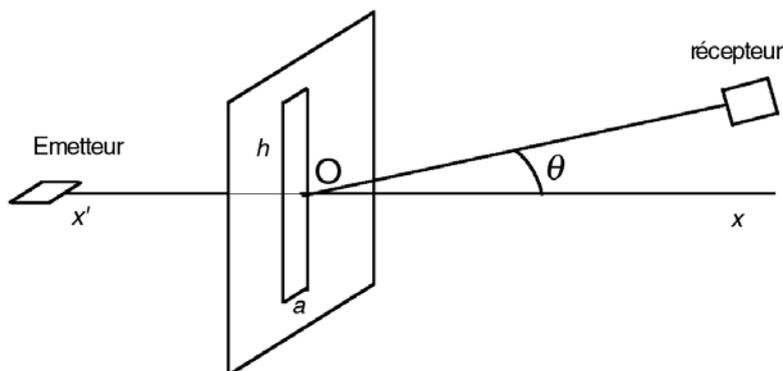
La mesure d'une durée peut être utilisée pour déterminer une longueur ou une vitesse.

E

xercices

► Exploiter une figure de diffraction en utilisant la relation : $\theta = \lambda/a$.

Exercice 1 Diffraction d'une onde ultrasonore



Un émetteur d'ultrasons émet des ondes planes se propageant selon une direction horizontale vers un écran vertical percé d'une fente de largeur $a = 1,5 \text{ mm}$ beaucoup plus petite que la hauteur h . On note O le milieu de la fente et $x'x$ la direction de l'axe perpendiculaire en O au plan de la fente, orienté de l'émetteur vers la fente.

On déplace un récepteur selon un arc de cercle centré en O , dans le plan horizontal contenant l'axe $x'x$ et on mesure, avec un voltmètre branché sur le récepteur, une tension proportionnelle à l'amplitude de l'onde reçue selon l'angle θ (mesuré par rapport à l'axe $x'x$).

Les résultats sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

θ (en $^\circ$)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
U (en mV)	100	93	75	50	23	1	16	22	19	10	1	9

- 1 Tracer la courbe représentant les variations de U en fonction de θ .
 - 2 En déduire la longueur d'onde, puis la fréquence des ultrasons émis.
- Les ultrasons se propagent dans l'air à la vitesse de $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

► Savoir que, étant diffractée, la lumière peut être considérée comme une onde. Connaître les limites des longueurs d'onde dans le vide du spectre visible.

Diffraction par une fente

Exercice 2 Un laser émet une radiation monochromatique, de longueur d'onde 633 nm , en direction d'une fente verticale de largeur a très inférieure à sa hauteur.

On observe alors, sur un écran placé à une distance $D = 1,00 \text{ m}$ derrière la fente et parallèle au plan de la fente une série de taches lumineuses horizontales, la tache centrale mesurant $d = 6,0 \text{ cm}$.



- 1 En déduire la largeur a de la fente.
- 2 Quelle figure de diffraction aurait-on obtenue en remplaçant la fente par un trou circulaire de diamètre a ?
- 3 Quelle figure de diffraction aurait-on obtenue en remplaçant la fente verticale de largeur a par un fil vertical de diamètre a ?

Exercice 3 Diffraction par un trou

On éclaire, avec une radiation monochromatique jaune de longueur d'onde $\lambda = 560 \text{ nm}$, une feuille verticale percée d'un trou circulaire de diamètre $a = 0,10 \text{ mm}$, et on observe une tache d'Airy de diamètre $d = 1,8 \text{ mm}$ sur un écran disposé parallèlement à cette feuille et derrière elle.

Quel serait le diamètre d' de la tache d'Airy si l'expérience était réalisée avec le même dispositif, mais en utilisant un éclairage monochromatique bleu de longueur d'onde $\lambda' = 470 \text{ nm}$?

► Savoir que les milieux transparents sont plus ou moins dispersifs et connaître la définition de l'indice d'un milieu transparent pour une fréquence donnée.

Exercice 4 Ce qui change, ce qui ne change pas

Soit les grandeurs énumérées ci-dessous et concernant la propagation d'une onde lumineuse plane monochromatique appartenant au rayonnement visible : fréquence ν de l'onde, période T de l'onde, vitesse V de propagation de l'onde dans le milieu, longueur d'onde λ , indice n du milieu, couleur, direction de propagation.

- 1 Indiquer, parmi ces grandeurs, lesquelles sont identiques pour deux ondes planes monochromatiques, l'une de longueur d'onde 470 nm et l'autre de longueur d'onde 670 nm , se propageant dans la même direction dans le vide.
- 2 Reprendre la question précédente en supposant que les deux ondes se propagent dans la même direction dans le verre.
- 3 Une onde monochromatique plane passe de l'air dans le verre. Indiquer, parmi les grandeurs proposées, celles qui resteront inchangées lors de ce changement de milieu.

Exercice 5 Réfraction

Un pinceau lumineux arrive au centre O d'un demi-cylindre de verre en faisant un angle de $45,0^\circ$ avec la normale $y'y$ à la face plane AB (voir figure ci-contre).

1 Expliquer pourquoi ce pinceau lumineux monochromatique ne subit pas de changement de direction en S lorsqu'il passe du verre dans l'air alors qu'il en subit un en O lorsqu'il passe de l'air dans le verre.

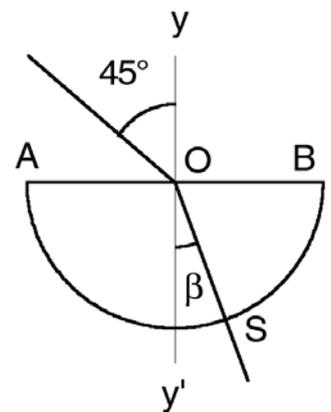
2 L'indice du verre dépend de la longueur d'onde λ de la radiation selon la relation :

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} \text{ avec } A = 1,554 \text{ et } B = 7,33 \cdot 10^{-15} \text{ m}^{-2}.$$

En déduire la valeur de l'angle β que fait le rayon réfracté dans le verre avec la normale $y'y$ s'il s'agit d'un rayon violet de longueur d'onde 420 nm , puis s'il s'agit d'un rayon rouge de longueur d'onde 680 nm .

3 Représenter (approximativement sur le schéma) le résultat de l'expérience réalisée avec un pinceau polychromatique de couleur blanche contenant toutes les couleurs de l'arc-en-ciel.

► Savoir que les niveaux d'énergie des systèmes microscopiques sont quantifiés et savoir calculer la longueur d'onde de la radiation émise lors d'une transition entre deux niveaux.



Exercice 6 Niveaux d'énergie atomiques

Lire attentivement le texte ci-dessous avant de répondre aux questions :

« L'énergie d'un atome ne peut augmenter que par "échelons", comme le montre le schéma page suivante.

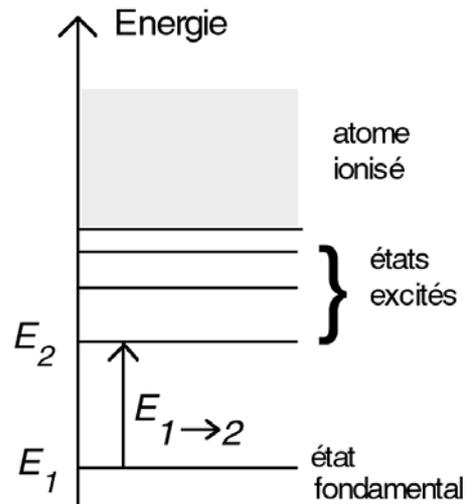
L'état fondamental est le niveau d'énergie le plus bas.

Si l'on communique de l'énergie à un atome (par chocs sur d'autres particules ou à l'aide d'un rayonnement lumineux que l'atome pourra absorber), il pourra accéder à un état excité correspondant à un

niveau d'énergie supérieur : ainsi, en communiquant à l'atome l'énergie $E_{1 \rightarrow 2} = E_2 - E_1$, on lui permet de passer du niveau fondamental au premier niveau excité.

Spontanément, l'atome "retombera" sur le niveau fondamental en perdant, par émission d'un rayonnement lumineux, l'énergie qu'il avait acquise. Chaque atome ne peut ainsi émettre qu'un spectre discontinu de radiations, qui constituent en quelque sorte sa signature.

Toutefois, si l'énergie reçue par l'atome est trop grande, il peut y avoir ionisation : un électron quitte alors l'atome et devient indépendant. On appelle énergie de première ionisation E_i l'énergie minimale qu'il faut fournir à l'atome initialement dans son état fondamental pour l'ioniser. Comme l'électron, séparé du noyau après ionisation, peut avoir une énergie cinétique quelconque, l'énergie de l'ensemble formé par l'ion et l'électron n'est plus quantifiée et les transitions vers des états de moindre énergie conduisent à l'émission de radiations dont la longueur d'onde est quelconque.



On voit bien sur le schéma ci-contre que l'énergie de l'atome ionisé pouvant prendre une valeur quelconque à l'intérieur de la zone en grisé, le retour vers un état excité ou vers l'état fondamental se fera avec émission d'une radiation dont la longueur d'onde n'a pas une valeur bien définie.

Le spectre est alors continu, ce qui s'observe effectivement pour l'émission de lumière des corps incandescents ».

Questions :

- 1 Représenter, sur le diagramme, l'énergie qu'il faut communiquer à l'atome, dans son niveau fondamental, pour le faire passer au deuxième niveau excité. Sous quelle forme peut-on lui communiquer cette énergie ?
- 2 Représenter, sur le diagramme, l'énergie d'ionisation de l'atome.
La longueur d'onde du rayonnement permettant d'ioniser l'atome est-elle supérieure ou inférieure à la longueur d'onde du rayonnement lui permettant d'accéder au premier niveau excité ?
Dans les deux cas, le niveau de départ est le niveau fondamental.
- 3 Expliquer la différence entre ce qu'on appelle spectre continu et ce qu'on appelle spectre de raies.
- 4 Si la transition d'un niveau d'énergie initial vers un niveau de moindre énergie s'accompagne de l'émission d'une radiation visible, entre quelles valeurs extrêmes (exprimées en eV) se situe la différence entre ces deux niveaux d'énergie ?
- 5 Expliquer la phrase de ce texte parlant de la « signature de l'atome ».
- 6 On choisit généralement une valeur de l'énergie nulle comme valeur de l'énergie pour l'atome tout juste ionisé (sans énergie cinétique pour l'électron séparé du noyau). Quel est alors le signe de l'énergie pour les niveaux correspondant à l'atome non ionisé ?

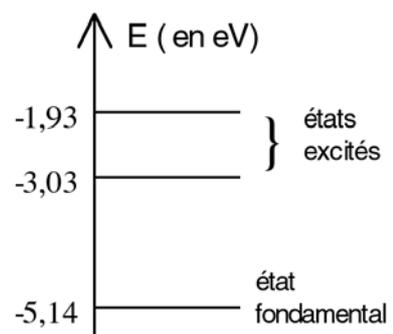
Données : $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Exercice 7 Niveaux d'énergie d'un atome de sodium

À partir du diagramme ci-contre représentant l'état fondamental et les deux premiers états excités de l'atome de sodium, calculer les longueurs d'onde émises lorsque l'atome retombe directement d'un niveau excité vers le niveau fondamental.

Données :

$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$;
 $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



Exercice 8 Niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène

Les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène sont donnés par la relation : $E_n = -\frac{E_0}{n^2}$ dans laquelle n est un entier supérieur ou égal à 1 et $E_0 = 13,60 \text{ eV}$.

① Représenter, sur un diagramme à l'échelle, les niveaux d'énergie pour n allant de 1 à 6 (compris). Quel est le niveau fondamental ?

② Calculer la longueur d'onde de la radiation qui, absorbée par un atome d'hydrogène dans son état fondamental, lui permettrait d'accéder au niveau $n = 3$.

③ Une lampe spectrale à hydrogène est constituée d'une ampoule dans laquelle deux électrodes établissent une haute tension. Les atomes d'hydrogène parviennent alors à des niveaux d'énergie excités et lorsqu'ils retombent sur le niveau correspondant à $n = 2$, ils émettent un certain nombre de radiations monochromatiques de lumière visible.

Dénombrer ces transitions donnant lieu à émission de lumière visible et calculer les longueurs d'onde correspondantes.

④ Quel type de rayonnement monochromatique est émis par l'atome d'hydrogène lors d'une transition d'un niveau excité vers le niveau fondamental ?

Données : $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Exercice 9 Vrai ou faux

Cet exercice se compose de quatre propositions totalement indépendantes les unes des autres.

Pour chacune d'elles, vous devrez d'abord dire si elle est exacte ou inexacte, puis vous justifierez votre réponse.

① Les photons émis lors des désintégrations radioactives et qui possèdent donc une énergie de l'ordre du MeV constituent un rayonnement de lumière visible.

Données : $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

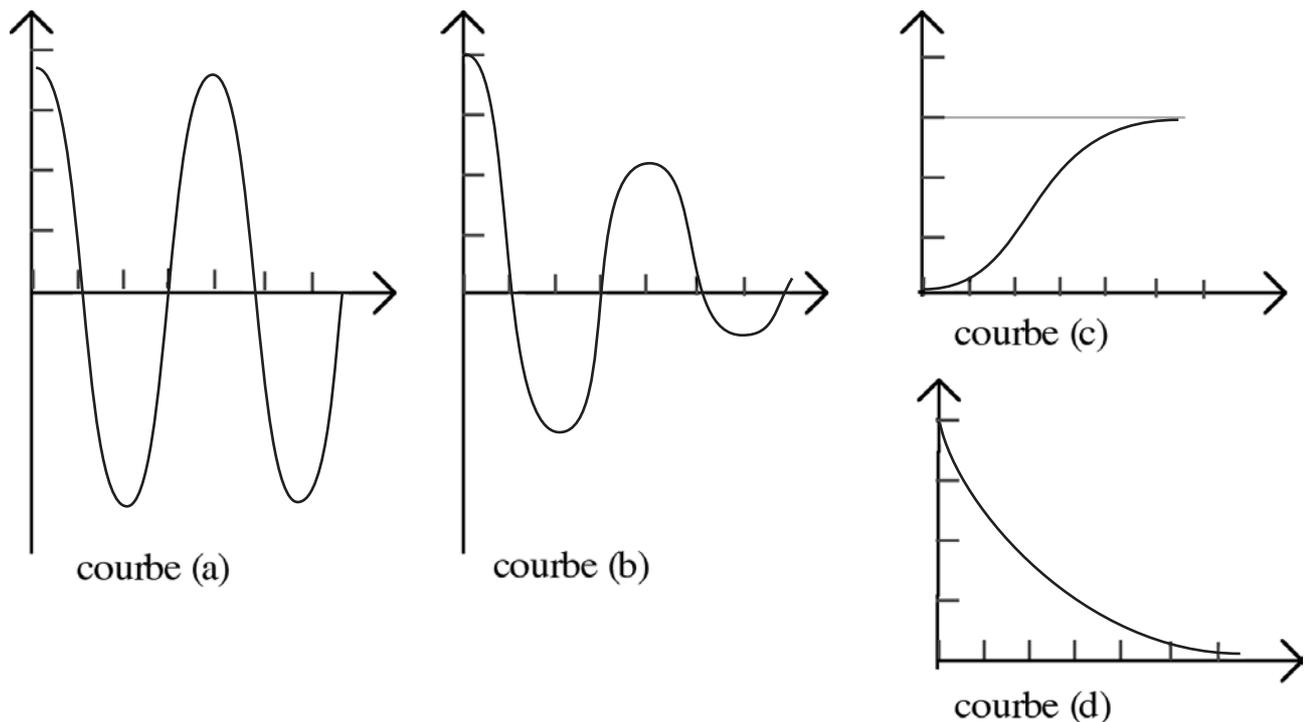
② Deux sources de lumière visible, l'une rouge et l'autre bleue, qui émettent des ondes monochromatiques de même puissance émettent le même nombre de photons par seconde.

③ La longueur d'onde de la radiation absorbée par un atome pour passer d'un niveau d'énergie E_n à un niveau d'énergie E_k est égale à la longueur d'onde de la radiation émise par cet atome lorsqu'il retourne du niveau d'énergie E_k au niveau d'énergie E_n .

④ Plus l'énergie transportée par le photon est grande, plus la longueur d'onde de la radiation à laquelle il appartient est petite.

► Connaître des exemples de phénomènes physiques permettant la mesure des durées et savoir utiliser la mesure d'une durée pour déterminer une longueur ou une vitesse.

Exercice 10 Évolution temporelle de divers phénomènes



Les quatre courbes ci-dessus indiquent les variations en fonction du temps de différentes grandeurs ;

❶ L'une de ces courbes représente la variation, en fonction du temps de l'activité d'un échantillon radioactif.

a) Identifier cette courbe.

b) Déterminer la demi-vie de l'échantillon radioactif sachant qu'une graduation sur l'axe horizontal correspond à une durée de 2 ans.

c) Si l'on admet que l'on utilise toujours le même compteur Geiger pour mesurer l'activité de l'échantillon mais qu'il devient très imprécis pour des activités dix fois plus faibles que l'activité initiale, quelle durée pourrait être mesurée avec cette méthode de datation ?

Cette méthode de datation présente-t-elle, pour une telle durée, un intérêt pratique ?

❷ L'une de ces courbes représente les variations en fonction du temps de la tension aux bornes d'un condensateur, de capacité $C = 2,0 \mu\text{F}$, initialement chargé puis relié à une bobine de résistance négligeable.

a) Identifier cette courbe.

b) Quelle courbe obtiendrait-on si la résistance de la bobine n'était pas négligeable ?

c) Quelle courbe obtiendrait-on si le condensateur se déchargeait dans une résistance et non dans une bobine ?

Exercice 11 La seconde

La seconde était initialement définie par rapport au jour solaire.

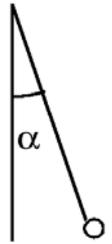
❶ Définir ce qu'on appelle un jour solaire. Quelle fraction du jour solaire représente une seconde ?

❷ Cette définition manquait de précision car la durée d'un jour solaire est soumise à de légères fluctuations saisonnières et elle augmente très lentement au fil des siècles. La durée actuelle définit la seconde comme la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 au repos.

En déduire la valeur de la longueur d'onde approximative de cette radiation, en utilisant pour valeur de la célérité de la lumière $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Exercice 12 Période du pendule simple

Un pendule simple est constitué d'une petite bille suspendue à un fil de longueur L . Ce pendule oscille dans un plan vertical et on constate que la période des oscillations dépend fortement de la longueur L , mais ne dépend pas de l'amplitude des oscillations (du moins tant que cette amplitude, mesurée par la valeur maximale de l'angle α que fait la direction du fil avec la verticale, reste faible, inférieure à 10°).



1 Préciser ce qu'on appelle période du pendule.

Pourquoi est-il préférable de déterminer la valeur de la période en mesurant la durée correspondant à 20 périodes plutôt qu'à une seule ?

2 En mesurant la valeur de la période T pour différentes valeurs de la longueur L , on obtient le tableau ci-dessous :

L (en m)	0,60	0,90	1,20	1,50	1,80
T (en s)	1,55	1,90	2,20	2,46	2,69

a) Calculer, pour chaque colonne du tableau, la valeur du rapport T^2/L . Conclusion ?

b) En déduire la valeur de L pour laquelle le pendule bat la seconde (sa période vaut alors $T = 2,0$ s).

Exercice 13 Durée et distance

Un télémètre est constitué d'un émetteur et d'un récepteur d'ultrasons. L'onde est envoyée en direction d'un obstacle sur lequel elle se réfléchit et l'appareil mesure la distance à laquelle se trouve l'obstacle en comptant la durée entre l'émission et la réception de l'onde.

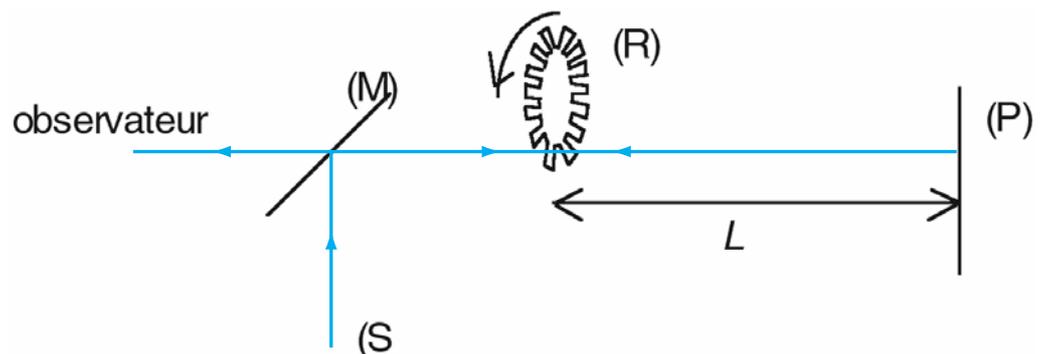
1 Quelle est cette distance si la durée mesurée vaut $25,2$ ms ? (On supposera que l'expérience est réalisée dans des conditions de température où la célérité du son vaut $340,0$ m \cdot s $^{-1}$).

2 Comment peut-on mesurer la distance terre-Lune à partir de la durée entre l'émission d'une onde et la réception de l'onde réfléchi ?

Exercice 14 Célérité du son et de la lumière

1 Décrire un dispositif expérimental permettant de mesurer la vitesse du son dans l'air.

2 Le schéma ci-contre représente le dispositif utilisé par le physicien Fizeau en 1849 pour mesurer la vitesse de la lumière dans l'air.



Une source (S) envoie un pinceau de lumière qui se réfléchit sur le miroir semi-transparent (M) puis passe dans l'encoche d'une roue dentée (R) avant de parcourir une grande distance L et de se réfléchir sur le miroir plan (P). Le pinceau réfléchi doit à nouveau passer dans une encoche de la roue dentée avant de traverser le miroir semi-réfléchissant et d'être perçu par l'observateur.

Lorsque la roue dentée, qui compte n dents régulièrement réparties, tourne lentement, l'observateur reçoit le pinceau lumineux.

Mais si on augmente la vitesse de rotation de la roue dentée, il existe une première valeur de N (nombre de tours effectués par la roue en une seconde) pour laquelle l'observateur ne reçoit plus de lumière. Exprimer la vitesse de la lumière en fonction de N , n et L .

Application numérique : $L = 15,0$ km, $n = 500$ et $N = 10$ tours par seconde.

Chimie

Objectifs

- ▶ Connaître la définition d'un catalyseur.
- ▶ Connaître différents types de catalyse.
- ▶ Savoir qu'un catalyseur agit sélectivement lors d'une transformation.

Le peroxyde d'hydrogène (ou eau oxygénée) a pour formule H_2O_2 .

Activité 1

a) Écrire l'équation de la réaction (de dismutation) associée à la transformation spontanée pouvant se produire dans une solution de peroxyde d'hydrogène.

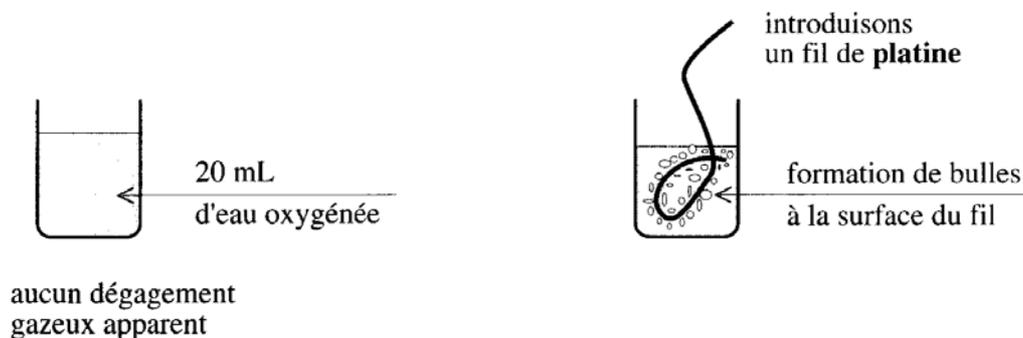
Donnée : Couples rédox : H_2O_2/H_2O et O_2/H_2O_2

b) Comment peut-on voir si cette transformation se produit ?

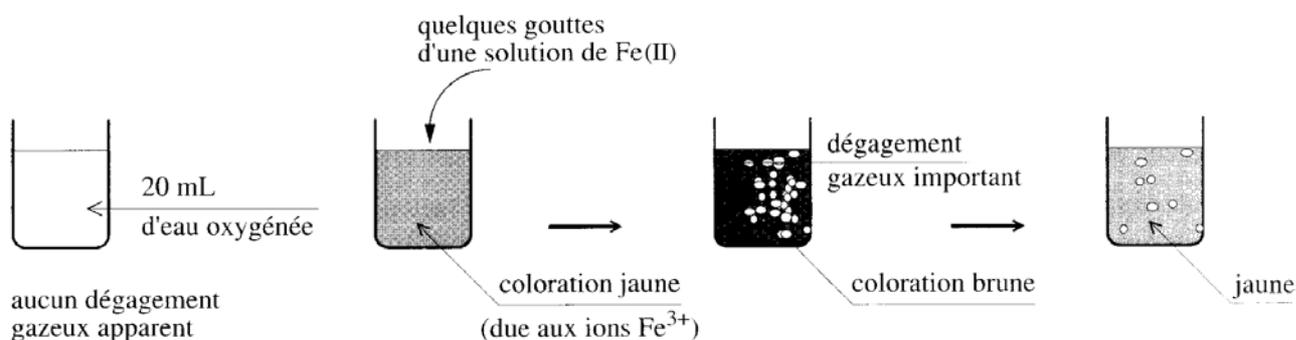
On dit que l'eau oxygénée est *métastable*.

Un *catalyseur* est une substance qui *augmente la vitesse* d'une réaction chimique associée à une transformation sans apparaître dans l'équation de la réaction.

Expérience n° 1



Expérience n° 2



Activité 2

a) Quels sont les 2 catalyseurs utilisés pour augmenter la vitesse de la réaction ?

b) À quelle phase (solide, liquide ou gazeuse) appartiennent-ils ? Dans quel cas parle-t-on de catalyse homogène ? de catalyse hétérogène ?

c) Quelle est l'équation de la réaction (1) associée à la transformation spontanée entre les ions fer (II) Fe^{2+} et l'eau oxygénée ? Donnée : Couples rédox H_2O_2/H_2O et Fe^{3+}/Fe^{2+} .

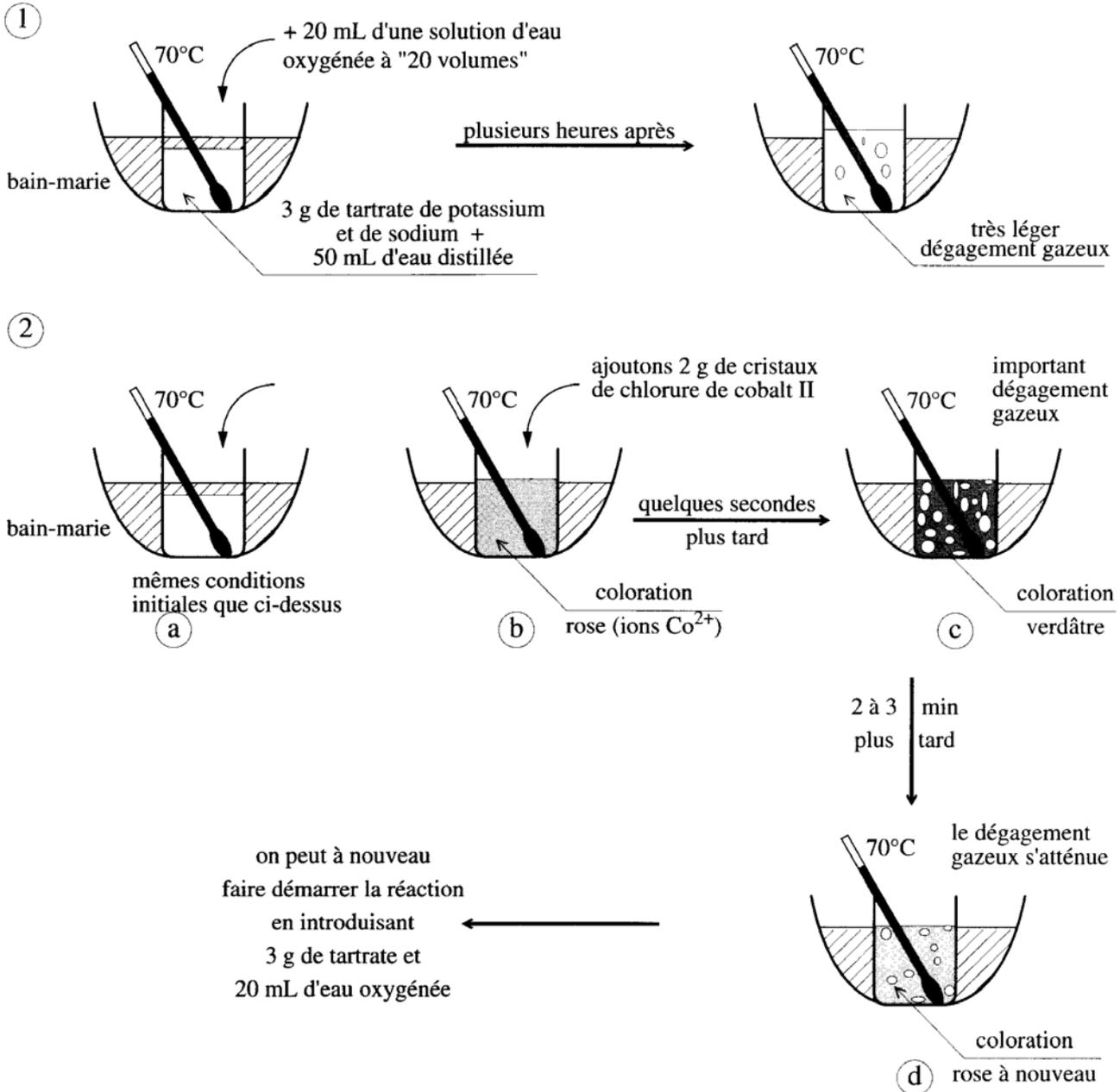
d) Quelle est l'équation de la réaction (2) associée à la transformation spontanée entre les ions fer (III) Fe^{3+} et l'eau oxygénée ? Donnée : Couples rédox Fe^{3+}/Fe^{2+} et O_2/H_2O_2 .

e) Écrire l'équation de la réaction globale (1) + (2).

f) Expliquer pourquoi l'ion fer (II) catalyse la réaction de dismutation de l'eau oxygénée.

L'ion tartrate (base conjuguée de l'acide tartrique $\text{HO}_2\text{C}-\text{CHOH}-\text{CHOH}-\text{CO}_2\text{H}$) a pour formule $^-\text{O}_2\text{C}-\text{CHOH}-\text{CHOH}-\text{CO}_2^-$.

Expériences



Activité 3 a) Les ions cobalt (II) ont-ils participé à la réaction entre l'eau oxygénée et le sel de Seignette ?

b) Pourquoi ces ions Co^{2+} ont-ils joué le rôle de catalyseur ?

On parle ici de **catalyse homogène** car le catalyseur appartient à la **même phase** que les réactifs.

Expérience de la lampe sans flamme :

On introduit dans un ballon, environ 20 mL d'éthanol et on le place sur une plaque chauffante de manière à obtenir, dans le ballon, un mélange d'air et d'éthanol gazeux.

On porte un fil de cuivre au rouge à l'aide de la flamme d'un bec bunsen puis on l'enlève de la flamme.

Activité 4 *Combien de temps le fil de cuivre reste-t-il incandescent ?*

On porte ce fil de cuivre à nouveau au rouge et on l'introduit rapidement dans l'atmosphère du ballon.

On constate que le fil de cuivre reste incandescent pendant plusieurs dizaines de secondes ; de plus une odeur fruitée se fait sentir.

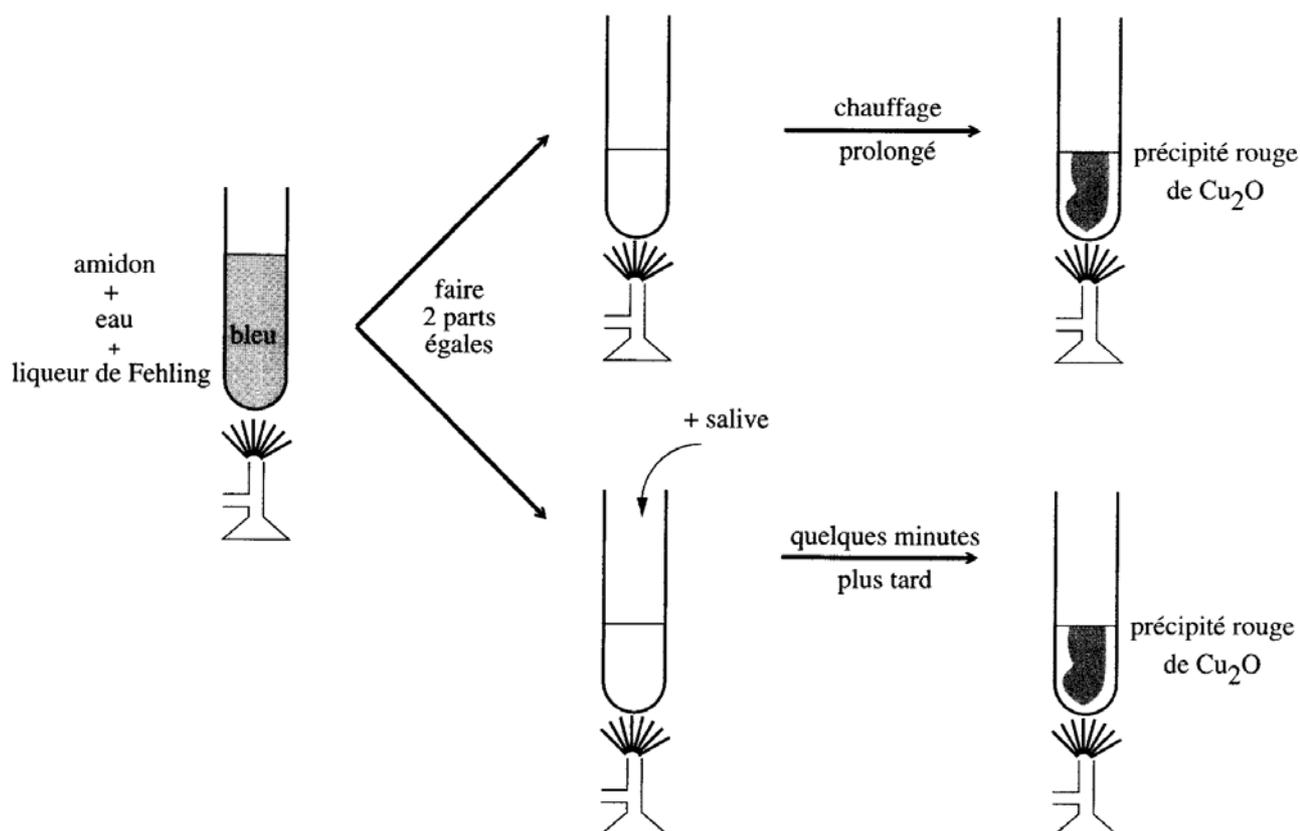
Activité 5 *Sachant que l'éthanol peut être oxydé par le dioxygène de l'air en éthanal (odeur fruitée) et en acide éthanoïque, quel est le catalyseur de cette réaction ?*

On parle ici de **catalyse hétérogène** car le catalyseur n'appartient pas à la même phase que les réactifs.

Les enzymes sont des protéines qui catalysent les transformations associées aux réactions se produisant dans les organismes vivants.

Par exemple, la salive contient une enzyme appelée amylase salivaire.

Expérience : Hydrolyse de l'amidon en glucose :



Activité 6 *Quel est le catalyseur de la réaction d'hydrolyse de l'amidon ?*

Dismutation de l'eau oxygénée :

Placer environ 20 mL d'eau oxygénée à 20 volumes dans un bécher.

Ajouter un petit morceau de navet : une effervescence se produit alors.

Activité 7 *Pourquoi peut-on dire que le navet contient une enzyme ?*

L'action des enzymes est caractérisée par :

- ▶ Une très grande **efficacité** (la vitesse de certaines réactions peut être multipliée par plus d'1 milliard !).
- ▶ Une très grande **sélectivité** (à cause de la complémentarité très étroite entre la structure et la forme des sites du catalyseur qui reçoit les réactifs et celles des réactifs eux-mêmes, comme les morceaux d'un puzzle).

L'eau oxygénée est toxique pour les cellules de l'organisme. Heureusement, une enzyme, présente dans le sang, catalyse la dismutation de H_2O_2 (c'est cette enzyme qui est responsable du dégagement de dioxygène lorsqu'on désinfecte une plaie à l'eau oxygénée).

Prenons l'exemple de l'action du dioxygène sur l'ammoniac : 2 réactions sont possibles : l'une qui mène à la formation de diazote et d'eau :



l'autre conduisant à la formation de monoxyde d'azote et d'eau selon l'équation :



La seconde réaction est intéressante pour l'industrie chimique car le monoxyde d'azote permet la préparation de l'acide nitrique alors que la première réaction forme du diazote présent naturellement dans l'air en grande quantité.

Il faut donc favoriser la seconde réaction aux dépens de la première.

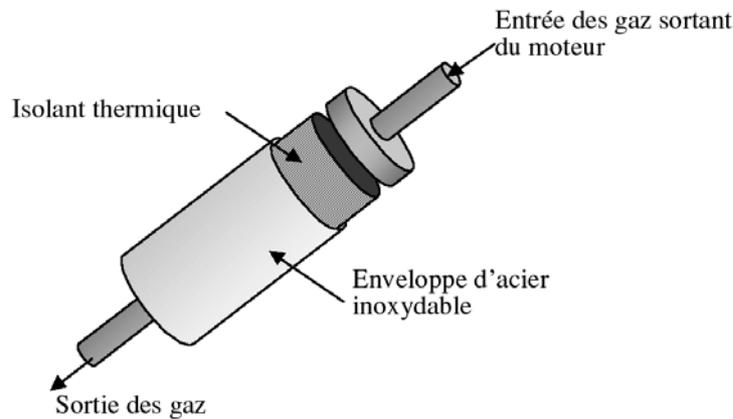
Pour cela, il faut mettre les réactifs en présence d'une toile de platine, ce qui rend la seconde réaction prépondérante.

Le catalyseur utilisé ici (le platine) agit **sélectivement** lors de la transformation.

Le pot catalytique des automobiles

Les moteurs à essence rejettent des gaz polluants comme le monoxyde de carbone CO, les hydrocarbures n'ayant pas réagi, les oxydes d'azote NO_x issus de l'oxydation à très haute température du diazote N₂ de l'air par le dioxygène qui n'a pas participé à la réaction de combustion des hydrocarbures.

Le pot catalytique est constitué d'une double enveloppe en acier inoxydable, d'un isolant thermique en céramique creusé en nid d'abeille et imprégné de métaux précieux tels le platine (Pt), le rhodium (Rh), le palladium (Pd). Les métaux précieux tapissent des milliards de micro-alvéoles.



Lorsque les gaz d'échappement passent à travers le pot catalytique, ces métaux favorisent des réactions chimiques capables de transformer des polluants. Par exemple, la transformation du monoxyde de carbone (CO) et de certains hydrocarbures en dioxyde de carbone CO₂ (moins polluant que CO) et en eau, la réduction des oxydes d'azote NO_x en diazote.

Les pots catalytiques permettent d'éliminer certains polluants (notamment le plomb), mais pas le gaz carbonique (ou dioxyde de carbone) ni les micro particules. Il est en effet impossible, pour l'instant, d'empêcher les émissions de dioxyde de carbone lors de la combustion des carburants.

Cependant, grâce au pot catalytique et à l'essence sans plomb, les taux de plomb, d'hydrocarbures, de dioxyde de soufre et de monoxyde de carbone ont globalement diminué dans notre pays.

- Activité 8**
- Quels sont les métaux précieux utilisés comme catalyseur dans les pots catalytiques des automobiles ?
 - Quels sont les conséquences de l'utilisation du pot catalytique pour l'environnement ?
 - L'industrie automobile utilise de grandes quantités de catalyseur ; quel(s) autre(s) secteur(s) industriel (ou artisanal) est aussi consommateur de catalyseur (chimique ou enzymatique) ?

Résumé

Un *catalyseur* est une substance qui augmente la vitesse de formation d'un produit sans apparaître dans l'équation-bilan de cette réaction.

La catalyse est *homogène* lorsque le catalyseur appartient à la même phase que les réactifs. Elle est *hétérogène* dans le cas contraire.

Le *mécanisme* (ou le déroulement) d'une réaction catalysée est différent de celui d'une réaction non catalysée car le catalyseur est consommé lors de certaines étapes élémentaires, puis restitué.

Les *enzymes* catalysent la plupart des processus chimiques naturels ainsi que de nombreuses réactions de l'industrie agroalimentaire.

La *catalyse enzymatique* est caractérisée par son efficacité et sa très grande sélectivité.

Un catalyseur est souvent *sélectif* : à partir des mêmes réactifs et dans des conditions expérimentales identiques, les produits obtenus dépendent du catalyseur utilisé.

Exercices d'applications

Exercice ① Décomposition catalytique de l'eau oxygénée

On étudie la décomposition catalytique de l'eau oxygénée (solution aqueuse de peroxyde d'hydrogène) dans un ballon maintenu à température constante. L'eau oxygénée H_2O_2 se décompose lentement en eau et dioxygène. À la date $t = 0$, on verse dans une solution contenant un catalyseur, la quantité d'eau oxygénée nécessaire pour que la solution de volume $V_0 = 1$ litre soit à la concentration $C_0 = 1 \text{ mol} \cdot L^{-1}$. Le volume V de dioxygène dégagé est mesuré à pression constante.

Les résultats sont les suivants :

t (heures)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	10,0
V (litres)	2,51	4,53	5,86	7,37	8,36	9,16	10,3	11,0	11,4	11,6	11,8	11,9

Dans les conditions de l'expérience, le volume molaire gazeux V_M vaut 24 litres et on admettra que le volume de la solution reste constant pendant la durée de l'opération.

- 1 Définir le terme : catalyseur. Citer un exemple de catalyse homogène et un exemple de catalyse hétérogène.
- 2 Écrire l'équation de la réaction de décomposition de l'eau oxygénée en eau et dioxygène.
- 3 Donner l'expression littérale de la concentration molaire volumique C en eau oxygénée à une date donnée en fonction du volume V de dioxygène dégagé. Avec les données numériques, vérifier que cette relation peut s'écrire :

$$C = 1 - \frac{V}{12}$$

Faire l'application numérique aux différentes dates.

- 4 Tracer sur papier millimétré la courbe représentant C en fonction du temps. Échelles en abscisse 1 cm pour 0,5 heure ; en ordonnée 1 cm pour $0,1 \text{ mol} \cdot L^{-1}$.
- 5 Déterminer graphiquement les vitesses de réaction aux dates $t = 0,5 \text{ h}$ et $t = 1,5 \text{ h}$.

Exercice ② Oxydation des ions tartrate

I – A – Données :

- 1 Une réaction d'oxydoréduction peut se produire si on met en présence l'oxydant d'un couple avec le réducteur d'un autre couple.
- 2 Les seules espèces chimiques intervenant dans l'exercice appartiennent à trois couples (oxydant/réducteur) : $CO_2/C_4O_6H_4^{2-}$; Co^{3+}/Co^{2+} ; H_2O_2/H_2O .
 $C_4O_6H_4^{2-}$: ion tartrate (incolore en solution) ; Co^{2+} : ion cobalt II (rose en solution) ; Co^{3+} : ion cobalt III (vert en solution) ; H_2O_2 : peroxyde d'hydrogène ou eau oxygénée.

- 3 Description d'une expérience :

Dans un bécher on met une solution contenant des ions tartrate, puis on ajoute de l'eau oxygénée. On n'observe rien de notable.

On chauffe au voisinage de $60^\circ C$. On n'observe toujours rien de notable. On ajoute une pincée de chlorure de cobalt (II). On observe successivement que :

- la solution prend une teinte rose ;
- la couleur devient rapidement verte et, simultanément, il se produit un dégagement gazeux abondant ;
- après quelques minutes, la couleur redevient rose et le dégagement gazeux cesse.

Pour cela, on réalise cinq expériences, les conditions expérimentales étant décrites dans le tableau suivant :

Expérience	$[I^-]_0$ (mol · L ⁻¹)	$[S_2O_8^{2-}]_0$ (mol · L ⁻¹)	Température (°C)	Catalyseur
1	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	20	Aucun
2	$4 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	20	Aucun
3	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	35	Aucun
4	$4 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	35	Aucun
5	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	20	Solution de sulfate de fer(II)

On note $[I^-]_0$ et $[S_2O_8^{2-}]_0$, les concentrations initiales.

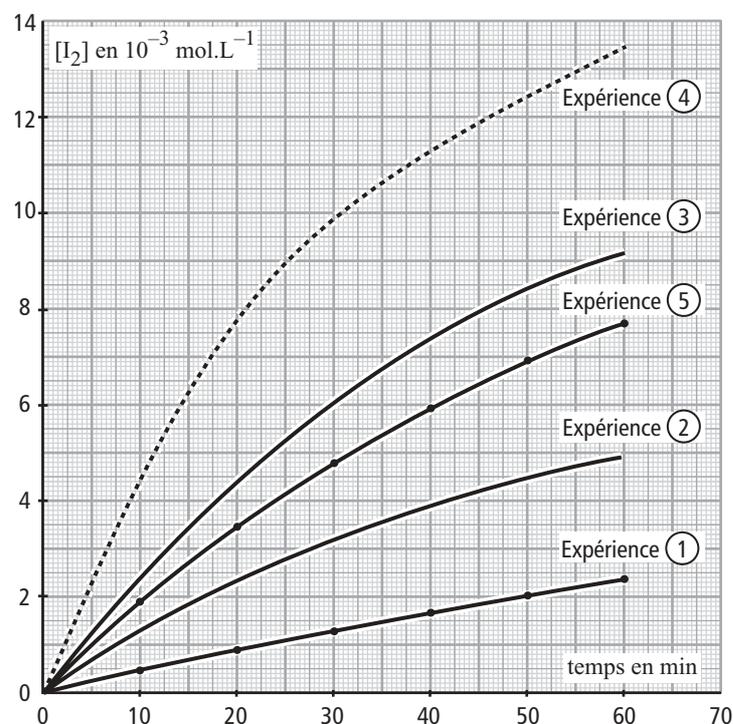
On réalise les mélanges à la date $t = 0$.

On étudie les variations de la concentration en diiode $[I_2]$ au cours du temps.

Les résultats sont rassemblés sur le graphique ci-après.

- ❶ Quelle est la valeur de la concentration en diiode à $t = 50$ min pour chacune des expériences ?
- ❷ Quel est, pour chaque mélange, le réactif limitant ?
- ❸ En comparant les courbes 1 et 2 d'une part, puis 3 et 4, d'autre part, quel facteur cinétique met-on en évidence et quel est son effet ?
- ❹ En comparant les courbes 1 et 3 d'une part, puis 2 et 4, d'autre part, quel facteur cinétique met-on en évidence et quel est son effet ?
- ❺ Dans l'expérience 5, on a affaire à une réaction catalysée.

Justifier cette affirmation en comparant les résultats de l'expérience 5 avec ceux d'une des quatre autres expériences.



Ce cours destiné aux inscrits du CNED a dû être rédigé et imprimé dans les plus brefs délais et malgré nos recherches, les détenteurs de droits de certains documents n'ont pu être identifiés.

Pour tout document publié sans contact pris avec les éditeurs ou ayants droit, leurs droits sont réservés au Centre National d'Enseignement à Distance, Institut de Rennes.

Les reproductions par reprographie de livres et de périodiques protégés contenues dans ce document sont effectuées par le CNED avec l'autorisation du CFC (20, rue des Grands Augustins – 75006 PARIS).