

Collection
E·S·P·A·C·E

Lycée



Physique Chimie

PROGRAMME 2012

Livre du professeur

ENSEIGNEMENT SPÉCIFIQUE ■ ENSEIGNEMENT DE SPÉCIALITÉ

Sous la direction de

Mathieu Ruffenach, Thierry Cariat, Valérie Mora

Jennifer Bonnin	Sylvie Mellet
Nicolas Courbaize	Dominique Mercier
Magali Darzac	Nicolas Nowak
Pierre Fabre	Itala Riahi
Christophe Feuvrie	Laurent Roure-Atger
Sébastien Firmin	Stéphane Serrano
Bastien Gravière	Laurent Toix
Olivier Krygiel	Gaël Toussaint
Guillaume Lozé	Walter Vassiaux
Adeline Marois	Cédric Vial

SOMMAIRE

ENSEIGNEMENT SPÉCIFIQUE

Partie 1 Ondes et matière

1	Rayonnements dans l'Univers	6
2	Ondes dans la matière	12
3	Caractéristiques des ondes	20
4	Propriétés des ondes	25
5	Spectres UV-visible et infrarouge	33
6	Spectres RMN du proton	38
	<i>En route vers le Bac</i>	45
	<i>Évaluation des compétences expérimentales</i>	48

Partie 2 Temps, mouvement et évolution

1	Mouvements et quantité de mouvement	49
2	Champ de force et mouvement	56
3	Mouvement dans l'espace	64
4	Travail d'une force	73
5	Transferts énergétiques	82
6	Temps et relativité restreinte	92
7	Cinétique chimique	98
	<i>En route vers le Bac</i>	106
	<i>Évaluation des compétences expérimentales</i>	110

Partie 3 Structure et transformation de la matière

1	Conformations des molécules	111
2	Chiralité	116
3	Les réactions en chimie organique	123
4	Déplacements d'électrons en chimie organique	129
5	Acides et bases	136
6	Réactions acido-basiques	144
	<i>En route vers le Bac</i>	151
	<i>Évaluation des compétences expérimentales</i>	154

Partie 4 Énergie, matière et rayonnement

1	Transferts thermiques	155
2	Énergie interne	162
3	Transferts quantiques d'énergie	168
4	Dualité onde-particule	172
	<i>En route vers le Bac</i>	177
	<i>Évaluation des compétences expérimentales</i>	180

Partie 5 Les défis du ^{xxi}^e siècle

1	Enjeux énergétiques	181
2	Chimie et respect de l'environnement	186
3	Contrôle de la qualité par dosage	192
4	Stratégie de la synthèse organique	199
5	Chaîne de transmissions d'informations	206
6	Numérisation d'un signal	213
7	Images numériques et stockage optique	221
	<i>En route vers le Bac</i>	227
	<i>Évaluation des compétences expérimentales</i>	230

Compléments

Sciences et histoire des arts	231
Culture scientifique	234

ENSEIGNEMENT DE SPÉCIALITÉ

Thème 1 L'eau

1	Eau et environnement	236
2	Eau et ressources	243
3	Eau et énergie	253

Thème 2 Son et musique

1	Instruments de musique	259
2	Émetteurs et récepteurs sonores	266
3	Son et architecture	276

Thème 3 Matériaux

1	Cycle de vie	283
2	Structure et propriétés des conducteurs	288
3	Membranes, adhésifs et tensioactifs	297
4	Nouveaux matériaux	304

Enseignement spécifique

Rayonnements dans l'Univers

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
<p>Rayonnements dans l'Univers</p> <ul style="list-style-type: none"> – Absorption de rayonnements par l'atmosphère terrestre. – Détecteurs d'ondes (électromagnétiques) et de particules (photons, particules élémentaires ou non). 	<ul style="list-style-type: none"> – Extraire et exploiter des informations sur l'absorption de rayonnements par l'atmosphère terrestre et ses conséquences sur l'observation des sources de rayonnements dans l'Univers. – Connaître des sources de rayonnement radio, infrarouge et ultraviolet. – Extraire et exploiter des informations sur : <ul style="list-style-type: none"> • des sources d'ondes et de particules et leurs utilisations ; • un dispositif de détection. – <i>Pratiquer une démarche expérimentale mettant en œuvre un capteur ou un dispositif de détection.</i>

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Connaître des sources de rayonnement et leur utilisation.
2. Comprendre la détection d'un rayonnement.
3. Analyser les conséquences de l'absorption de rayonnements par l'atmosphère terrestre.

Évaluation diagnostique

p. 12

SITUATION 1

La lumière visible est une petite partie de l'ensemble des rayonnements électromagnétiques que l'on rencontre dans l'Univers. Les rayonnements se trouvant avant 380 nm sont appelés infrarouges et ceux situés au-delà de 780 nm font partie des ultraviolets.

L'**activité 1** présente le spectre électromagnétique dans son ensemble et montre l'intérêt des observations dans les différents domaines de rayonnements. L'**activité 2** montre comment il est possible de déduire des propriétés des sources à partir des rayonnements qu'elles émettent.

SITUATION 2

La lumière visible peut être détectée par notre œil qui n'est sensible qu'à cette catégorie de rayonnement. Les autres rayonnements électromagnétiques se manifestent par des variations des champs électrique et

magnétique. Il est donc nécessaire d'utiliser un détecteur sensible à ces phénomènes.

L'**activité 3** propose de visualiser un rayonnement infrarouge en utilisant un détecteur adapté.

SITUATION 3

Les détecteurs astronomiques ne sont pas installés sur des satellites pour être plus proche des objets célestes à observer. L'altitude des satellites reste en effet très faible par rapport aux distances des astres qui nous entourent. L'utilisation d'observatoires spatiaux s'explique par la nécessité de s'affranchir des contraintes posées par l'atmosphère terrestre : absorption de rayonnement, poussières, turbulence, etc.

L'**activité 4** permet de mettre en évidence expérimentalement l'absorption de rayonnement.

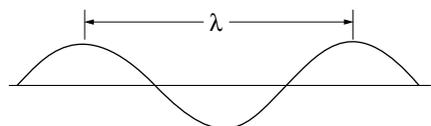
ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

Différents rayonnements

p. 14

1. a. Une onde peut être représentée par une vague à la surface de l'eau (cf. figure ci-dessous).



b. La longueur d'onde, notée λ , est la distance séparant deux positions identiques (cf. figure ci-dessus).

2. a. Les noms des différents domaines sont : radio, infrarouge, visible, ultraviolet, X et gamma.

b. a : gamma ; b : X ; c : ultraviolet ; d : visible ; e : infrarouge ; f : radio.

3. L'œil humain est sensible aux rayonnements visibles, ce qui correspond à une très faible portion du spectre électromagnétique. La majeure partie de ces rayonnements n'est donc pas détectée par notre œil.

4. a. Ces zones sont le cœur de la galaxie et des étoiles réparties en spirale autour, dont les contours sont cachés par les nuages de poussières.

b. Sur la galaxie Andromède, les zones les plus chaudes sont situées au centre de la galaxie et en certains points dans le plan de la galaxie.

5. La « lumière invisible » est le nom donné aux rayonnements du spectre électromagnétique auxquels l'œil n'est pas sensible.

ACTIVITÉ 2

Les sources de rayonnements

p. 15

1. a. ① : X ; ② : ultraviolet ; ③ : visible ; ④ : infrarouge ; ⑤ : radio.

b. Dans le spectre représenté figure 1, un pic, noté b, apparaît dans le domaine visible. Cet astre peut donc être observé.

2. a : rayonnement de freinage – interactions électrons/ions.

c : rayonnement thermique – température élevée.

d : rayonnement synchrotron – interaction électrons/champ magnétique.

3. a. La courbe a est située aux faibles longueurs d'onde. L'astre est donc entouré d'un nuage de particules de haute densité. La courbe c est située dans une zone de longueur d'onde intermédiaire. L'astre a une température importante. La courbe d est située dans le domaine radio, la vitesse des électrons émis par l'astre et son champ magnétique sont importants.

b. Le mot « supernova » est utilisé pour qualifier l'explosion d'une vieille étoile qui éjecte brutalement de la matière. Sa luminosité augmente alors brutalement.

ACTIVITÉ 3

Casque sans fil

p. 16

1. D'après les données techniques, la sensibilité de la webcam s'étend jusqu'à 1 050 nm, soit dans le domaine infrarouge. Cet instrument pourra donc détecter les rayonnements envoyés par l'émetteur.

2. a. Il suffit de placer la webcam en face de l'émetteur infrarouge et d'observer les diodes en façade.

b. Lorsqu'un signal sonore est émis, les diodes initialement éteintes s'illuminent sur l'écran de l'ordinateur auquel est relié la webcam. L'observation directe de l'émetteur ne permet pas de voir ce phénomène.

3. a. Un rayonnement est monochromatique quand sa longueur d'onde ne prend qu'une seule valeur. La courbe de la figure 2 montre un pic marqué, ce qui correspond à un rayonnement quasi monochromatique.

b. Le pic est centré sur une longueur d'onde de valeur 900 nm.

4. a. La longueur d'onde d'émission des diodes n'appartient pas au domaine de sensibilité du luxmètre. Cet instrument ne sera donc pas sensible à ce rayonnement.

b. L'expérience confirme la réponse précédente.

5. a. Un capteur ne peut pas détecter tous les rayonnements. Il n'est sensible qu'à un intervalle donné de longueur d'onde appelé : « intervalle de sensibilité spectrale ».

b. Le choix d'un capteur est essentiel lors de la détection des rayonnements. Il est nécessaire de choisir un capteur, donc l'intervalle de sensibilité correspond aux types de rayonnement à observer.

ACTIVITÉ 4

Lunettes de soleil

p. 17

En utilisant une lampe à vapeur de mercure dont le spectre présente une raie d'émission à 404 nm (UV proche). On obtient les spectres suivants :

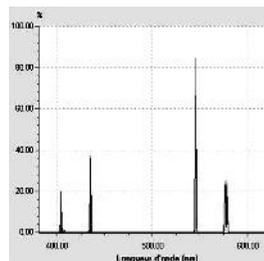


Fig. A

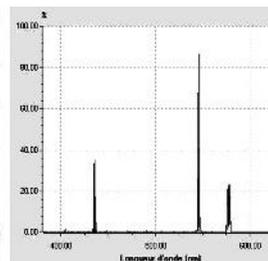


Fig. B

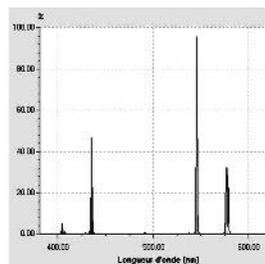


Fig. C

1. Avec une lampe à décharge, on obtient un spectre de raies. Avec la lumière du Soleil ou d'une lampe, on obtient un spectre continu.

2. a. Le domaine ultraviolet débute pour une longueur d'onde de 400 nm.

b. Le spectre de la lampe à vapeur de mercure présente une raie d'émission de longueur d'onde 404 nm. Elle émet donc dans l'ultraviolet (fig. A ci-avant).

3. En science, un témoin est une référence qui servira d'élément de comparaison. Il peut être utilisé pour évaluer les effets de la modification d'un paramètre du phénomène étudié.

4. a. Le spectre obtenu avec les verres solaires ne présente plus le pic ultraviolet initial. Cette radiation a été absorbée par le matériau traversé (fig. B ci-avant).

b. et c. La courbe de la figure 2 montre que les verres UV400 absorbent tous les rayonnements dont la longueur d'onde dépasse 400 nm. Ce qui a été le cas pour les verres utilisés.

5. Le même travail réalisé avec des lunettes de soleil « fantaisies » montre que la raie ultraviolette n'est pas totalement absorbée (fig. C ci-avant). Toutes les lunettes solaires ne présentent pas une protection suffisante.

6. L'atmosphère terrestre stoppe une partie des rayonnements émis par le Soleil, dont une partie des rayonnements ultraviolet (comme les verres solaires).

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : *Connaître des sources de rayonnement et leur utilisation*

1 1. a.

2. c.

2 1. Un spectre est la représentation en fonction d'une grandeur physique (énergie, fréquence, longueur d'onde...) des composantes d'un rayonnement.

2. a. Sur le schéma proposé, les valeurs sur l'axe gradué correspondent à la longueur d'onde.

b. La longueur d'onde s'exprime en mètre.

3. Le domaine visible occupe une étroite bande de longueur d'onde entre 4×10^{-7} et 7×10^{-7} m.

4. a. On parle d'ondes millimétriques pour les ondes dont l'ordre de grandeur des longueurs d'onde est le millimètre, soit 10^{-3} m.

b. L'énergie transportée par le rayonnement évolue inversement à la longueur d'onde. Les ondes radio sont donc peu énergétiques.

c. Radiodiffusion, radar, four à micro-ondes, téléphonie mobile, wifi...

3 1. L'arc-en-ciel comprend une infinité de couleurs, et non sept, correspondant au spectre de la lumière blanche.

2. Il est possible d'obtenir un spectre de lumière blanche en utilisant un prisme en verre.

3. a. Les rayonnements infrarouges se situent au-delà de la partie rouge de l'arc-en-ciel, alors que les rayonnements ultraviolets sont en deçà du violet.

b. On parle de lumière invisible car ces rayonnements électromagnétiques sont de même nature que la lumière mais ne sont pas visibles par l'œil humain.

c. Ultraviolet : transmission par fibre optique, polymérisation, stérilisation à froid, sérigraphie...

Infrarouge : chauffage, cuisson, thermoformage des matières plastiques...

4 1. a. Le caractère long ou court des ondes fait référence à la valeur de la longueur d'onde correspondante.

b. La courbe rouge illustre l'évolution de la valeur de la longueur d'onde du domaine radio au domaine gamma.

c. Les ondes les plus courtes correspondent au domaine gamma.

2. a. L'ordre de grandeur correspond à la puissance de dix la plus proche du nombre considéré.

b. Un intervalle de « 15 ordres de grandeur » correspond à une étendue de 10^{15} mètres. Cette valeur correspond à la différence des deux valeurs, 10^3 m et 10^{-12} m, données sur le schéma.

5 1. Les rayonnements X transportent davantage d'énergie que les rayonnements visibles.

2. a. Le centre de la galaxie apparaît en rose/violet : il émet donc essentiellement dans le domaine X.

b. Les sources les plus énergétiques se trouvent donc à proximité du centre de la galaxie.

3. Afin de représenter les sources de rayonnements X, invisibles pour l'œil humain, on utilise des couleurs du domaine visible (ici, le rose et le violet). On parle donc de photographie en « fausses couleurs » car les rayonnements invisibles sont colorés.

COMPÉTENCE 2 : *Comprendre la détection d'un rayonnement*

6 1. b.

2. c.

8 1. a. Un photodétecteur est sensible aux rayonnements électromagnétiques.

b. On parle de convertisseur car il transforme une grandeur physique en une grandeur de nature différente : ici, il s'agit d'une conversion de l'énergie transportée par un rayonnement en signaux électriques.

2. Les capteurs appelés CCD (*charge coupled device*) et CMOS (*complementary metal oxide semiconductor*) font référence à deux technologies différentes de capture d'image. Ces deux capteurs convertissent un rayonnement en signal électrique. Dans un capteur CCD, l'ensemble des pixels contribue au signal électrique obtenu alors que dans un capteur CMOS chaque pixel se comporte comme un convertisseur.

9 1. Sur ce télescope, la surface qui intercepte les rayonnements est le miroir ②.

2. Les rayonnements sont captés par le miroir ②, qui les oriente vers le miroir secondaire ①, lequel concentre alors les rayonnements en direction du détecteur.

3. a. Le détecteur se situe en bas du télescope, à l'arrière du « miroir » ②.

b. Le miroir ② est percé pour permettre le passage des rayonnements en direction du détecteur.

10 1. Le courant électrique modélise le déplacement des charges électriques dans les conducteurs. L'intensité I d'un courant électrique correspond aux nombres de charges traversant une surface particulière pendant un certain temps. Elle s'exprime en ampère, noté A .

2. Flèche verte : photon ; disque noir : électron ; flèche rouge : sens de circulation des électrons.

3. a. L'intensité du courant électrique augmente linéairement avec l'intensité du rayonnement incident augmente.

b. Une relation de proportionnalité peut être représentée par une fonction linéaire (droite passant par l'origine).

COMPÉTENCE 3 : Analyser les conséquences de l'absorption de rayonnements par l'atmosphère terrestre

11 1. *Faux.* L'atmosphère terrestre est opaque pour les rayonnements ultraviolets.

2. *Faux.* L'atmosphère terrestre est transparente pour les rayonnements radio.

3. *Faux.* Dans le domaine infrarouge, certaines bandes de longueurs d'onde ne sont pas absorbées par l'atmosphère.

4. *Faux.* Il existe deux fenêtres atmosphériques, dans les domaines visible et radio.

12 1. a. Les rayonnements visibles et radio.

b. Il n'est pas possible d'observer depuis la Terre les rayonnements ultraviolets.

2. C'est l'absorption par l'atmosphère.

3. Pour placer des « détecteurs au-dessus de l'atmosphère », il est possible d'utiliser un ballon sonde, un avion ou des satellites.

14 Le télescope Spitzer

Depuis de nombreuses années, les astronomes ont essayé de placer des télescopes au-dessus de l'atmosphère, afin d'obtenir un aperçu du mystérieux univers infrarouge. Ce projet atteint son apogée avec le télescope spatial Spitzer construit par la NASA.

1. Pour quel domaine du spectre électromagnétique le télescope spatial Spitzer a-t-il été conçu ?

D'après le texte, le télescope spatial Spitzer a été conçu pour observer dans le domaine infrarouge.

2. Quel est l'intérêt d'utiliser un satellite pour observer ces rayonnements ?

L'atmosphère terrestre est quasiment opaque aux rayonnements infrarouges. L'utilisation d'un satellite permet d'éviter l'absorption de ces rayonnements.

3. Quels sont les autres domaines du spectre qui nécessitent l'usage d'un satellite ?

L'atmosphère terrestre est également opaque aux rayonnements gamma et X ainsi qu'à la majeure partie des rayonnements ultraviolets. Ces observations nécessitent donc le télescope spatial.

4. À quoi servent les panneaux solaires présents sur le satellite ?

Les panneaux solaires photovoltaïques fournissent l'énergie électrique dont il a besoin.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

15 1. a. La lumière blanche est composée d'une infinité de radiations monochromatiques. Le spectre de cette lumière est le nom donné à la figure obtenue lorsque ces radiations sont dispersées.

b. Un spectre peut être obtenu par un prisme en verre.

2. a. Voir rabats en fin de manuel.

b. D'après le texte, Herschel réalise son observation au-delà de la zone rouge du spectre de la lumière blanche.

3. a. Ces rayonnements sont appelés infrarouge.

b. Ce rayonnement est qualifié d'invisible car il ne peut pas être vu par l'œil humain.

16 1. $0,01 \text{ nm} = 1 \times 10^{-11} \text{ m}$;

$20 \text{ nm} = 2,0 \times 10^{-8} \text{ m}$; $400 \text{ nm} = 4,00 \times 10^{-7} \text{ m}$;

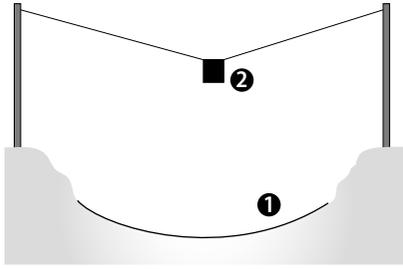
$1\ 000 \text{ nm} = 1,000 \times 10^{-6} \text{ m}$; $1\ 000\ 000 \text{ nm} = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$.

2. a. On peut choisir 1 cm pour 10^{-1} m . On obtient un axe d'une dizaine de centimètres.

b. Une échelle linéaire n'est pas envisageable. La longueur nécessaire pour représenter l'axe serait trop importante.

3. Voir figure en haut de la page 25 du manuel.

17 1. a. Voir schéma ci-dessous.



b. Voir schéma ci-dessus. On note ① la position de la surface qui intercepte les rayonnements et ② la position du détecteur.

2. a. Un radiotélescope est un instrument conçu pour réaliser des observations dans le domaine radio.

b. Le domaine radio s'étend au-delà de 10^{-3} m.

3. Les pulsars sont des radiosources dont l'intensité varie périodiquement avec une grande régularité. L'origine de ces variations n'est pas encore complètement identifiée.

18 1. a. Les deux photographies de la même galaxie ne sont pas identiques même si l'allure générale est la même.

b. Dans le domaine infrarouge, le cœur de la galaxie est clairement visible alors qu'elle ne peut être distinguée en lumière visible.

2. La lumière diffuse, qui apparaît en lumière visible, est certainement due à des nuages de poussières interstellaires, ce qui ne permet pas à la lumière produite au centre de la galaxie de nous parvenir.

3. a. On note D la distance Terre-M104 :

$$D = 28 \times 9,5 \times 10^9 = 2,7 \times 10^{11} \text{ km.}$$

19 JCMT

Situé au sommet de la Kea Maurea sur l'île d'Hawaï, le télescope James Clerk Maxwell (JCMT) est le plus grand télescope conçu spécifiquement pour étudier les longueurs d'onde millimétriques du spectre électromagnétique. Le capteur du JCMT est protégé par une bâche.

1. a. Quel domaine du spectre électromagnétique peut étudier le JCMT ?

D'après le texte, le JCMT permet l'étude des rayonnements radio dont les longueurs d'onde sont de l'ordre du millimètre.

b. Les rayonnements de ce domaine sont-ils absorbés par l'atmosphère ?

L'atmosphère terrestre est transparente aux ondes radios. Elles ne sont en effet pas absorbées par ses différents composants.

2. Comment est-il possible de détecter ces rayonnements à travers une bâche ?

Une bâche est opaque à la lumière visible mais complètement transparente pour les rayonnements radio. La bâche n'absorbe pas les ondes à ces longueurs d'onde.

3. Quel est l'intérêt de construire le JCMT sur un sommet d'une île éloignée ?

La construction d'un observatoire en altitude permet d'augmenter la pureté de l'atmosphère environnant (peu de vapeur d'eau, peu de poussière...). Le choix d'une île permet d'éviter d'être gêné par les sources de rayonnements utilisés par l'Homme.

20 1. Il est possible de discerner les détails de la surface de la Terre sur le cliché ①. Cette photo correspond au domaine visible, car l'atmosphère est transparente pour cette catégorie de rayonnements qui peuvent donc atteindre la surface terrestre sans être absorbés.

2. Infrarouge/Photo ② : tous les points du globe sont visible selon leur température.

Ultraviolet/Photo ③ : seule la face de la Terre exposée aux rayonnements solaires, qui sont absorbés, est visible.

X/Photo ④ : les aurores boréales sont visibles aux pôles.

21 1. Le Big Bang est le nom donné à l'explosion primitive qui aurait eu lieu il y a plusieurs milliards d'années alors que toute la matière de l'Univers se trouvait concentrée en un point.

2. Les neutrinos « traverse la Terre sans la voir », ils ne sont pas absorbés par la matière rencontrée. Leur déplacement n'est pas modifié par la Terre.

3. Plus la surface d'un détecteur est importante, plus le nombre de particules détectées est grand.

4. Les détecteurs de neutrinos sont généralement enterrés afin de s'affranchir du bruit de fond créé par le rayonnement cosmique.

22 1. Les zones blanches correspondent aux zones de transparence de l'atmosphère, donc essentiellement aux domaines radio et visible.

2. On constate que le domaine infrarouge présente d'étroites bandes de transparences (autour de 1 mm et entre 1 μm et 10 μm).

3. a. Les rayonnements ultraviolets sont absorbés dans une bande atmosphère comprise entre 90 km et 140 km.

b. Au-delà de ces altitudes, les satellites peuvent être utilisés pour transporter les instruments d'observation ultraviolets.

23 1. a. La donnée « 840 nm » correspond à la longueur d'onde du rayonnement émis par la diode de la télécommande.

b. Cette valeur de longueur d'onde appartient au domaine infrarouge.

2. Lorsque la diode émet un rayonnement, l'œil humain ne perçoit aucune lumière. Ce détecteur, limité au domaine visible, n'est en effet pas sensible aux infrarouges.

3. La plaque de verre absorbe totalement les rayonnements infrarouges émis par la diode.

24 1. La limite entre les domaines visible et ultraviolet se situe à 400 nm. Les UV-A sont donc plus proches du domaine visible que les UV-B.

2. Les UV peuvent être responsables de brûlures de la peau (coup de soleil) mais également de cancer de la peau (mélanome). Les crèmes solaires constituent une protection efficace.

3. a. Les rayonnements ultraviolets sont absorbés par l'atmosphère terrestre.

b. La couche d'ozone est le nom donné à une bande atmosphérique, située entre 20 et 50 km d'altitude, essentiellement constituée d'ozone, de formule chimique O_3 .

25 1. a. Le graphique associé à l'œil a une valeur maximale de 1. La valeur maximale de l'efficacité quantique de l'œil est donc de 1 photon détecté pour 100 photons incidents.

b. Le maximum d'efficacité quantique de l'œil humain est situé à une longueur d'onde de 550 nm (couleur jaune).

2. a. Le détecteur le plus efficace est celui qui présente la meilleure efficacité quantique, ici le capteur CCD.

b. Les capteurs CCD sont présents dans de nombreux appareils photographiques numériques par exemple.

3. a. Le maximum d'efficacité quantique des photomètres se trouve autour de 350 nm. Ces détecteurs ont donc un maximum de sensibilité dans le domaine ultraviolet.

b. Pour un rayonnement de longueur d'onde 400 nm, les photodétecteurs captent environ 20 photons sur 100.

4. a. La courbe représentant l'efficacité quantique des plaques photographiques s'annule pour une longueur d'onde de 700 nm, ce qui correspond à la limite entre les domaines visible et infrarouge. Les plaques photographiques ne sont donc pas sensibles aux infrarouges.

b. Les capteurs CCD ont une grande efficacité quantique sur un large domaine de longueurs d'onde.

5. Une échelle logarithmique est telle que chaque unité de l'échelle verticale est un multiple de 10. Cela permet

de couvrir une large gamme de valeur sur une distance plus courte.

EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

26 1. La fréquence, souvent notée f , est le nombre de fois qu'un phénomène se produit à l'identique en une seconde. Elle s'exprime en Hz (hertz).

2. a. c : vitesse de la lumière dans le vide en $m \cdot s^{-1}$; λ : longueur d'onde en m et f : fréquence en Hz.

b. On peut écrire $c = \lambda \cdot f$ soit $f = \frac{c}{\lambda}$. La fréquence est donc inversement proportionnelle à la longueur d'onde.

3. a. On utilise les valeurs données dans le schéma : à une longueur d'onde de 1×10^{-6} m correspond une fréquence de 3×10^{14} Hz. D'où :

$$c = \lambda \cdot f \Rightarrow c = 1 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^{14} = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

b. La valeur de la longueur d'onde limite entre les rayonnements radio et infrarouge vaut 1×10^{-3} m. On en déduit la valeur de la fréquence correspondante :

$$f = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow f = \frac{3 \times 10^8}{1 \times 10^{-3}} = 3 \times 10^{11} \text{ Hz}.$$

4. Dans le Système International d'unité, l'énergie s'exprime en joule, symbole J.

5. a. La valeur limite de l'énergie entre le domaine visible et infrarouge vaut 1×10^{-3} eV.

Soit $1 \times 10^{-3} \times 1,6 \times 10^{-19} = 1,6 \times 10^{-22}$ J.

b. On peut écrire $E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \Rightarrow h = \frac{E \cdot \lambda}{c}$, d'où :

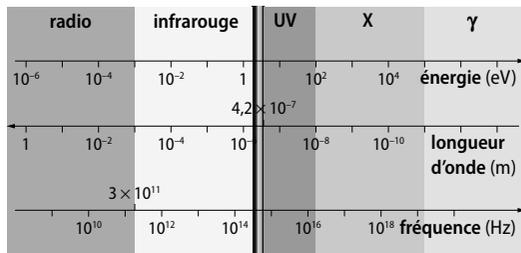
$$h = \frac{E \cdot \lambda}{c} \Rightarrow [h] = \frac{[J] \cdot [m]}{[m \cdot s^{-1}]} = [J] \cdot [s^{-1}].$$

La constante h s'exprime donc bien en $J \cdot s^{-1}$.

c. Le domaine ultraviolet débute pour une valeur de l'énergie de 5 eV. D'où :

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{h \cdot c}{E} \Rightarrow \lambda = \frac{6,6 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{3 \times 1,6 \times 10^{-19}} = 4,2 \times 10^{-7} \text{ m}.$$

6. Les résultats précédents sont cohérents avec les valeurs déjà présentes sur le graphique :



Ondes dans la matière

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
<p>Les ondes dans la matière.</p> <ul style="list-style-type: none"> – Houle, ondes sismiques, ondes sonores. – Magnitude d'un séisme sur l'échelle de Richter. – Niveau d'intensité sonore. <p>Détecteurs d'ondes (mécaniques).</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Extraire et exploiter des informations sur les manifestations des ondes mécaniques dans la matière. – Connaître et exploiter la relation liant le niveau d'intensité sonore à l'intensité sonore. – Extraire et exploiter des informations sur : <ul style="list-style-type: none"> • des sources d'ondes et leurs utilisations ; • un dispositif de détection. – Pratiquer une démarche expérimentale mettant en œuvre un capteur ou un dispositif de détection.

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Connaître les manifestations des ondes mécaniques dans la matière.
2. Comprendre l'émission et la détection d'une onde mécanique.
3. Connaître et exploiter la relation liant le niveau d'intensité sonore à l'intensité sonore.

Évaluation diagnostique

p. 30

SITUATION 1

Il s'agit d'amener les élèves à formuler l'idée qu'une onde transporte de l'énergie. Par exemple, les ultrasons apportent l'énergie nécessaire à la destruction des calculs rénaux.

L'**activité 1**, à travers différents exemples, met en évidence les transferts d'énergie dans un milieu matériel parcouru par une onde mécanique.

L'**activité 2** s'intéresse plus particulièrement à l'énergie transportée par les ondes sonores, et l'**activité 3** à celle transportée par les ondes sismiques.

SITUATION 2

Dans la vie quotidienne, le niveau sonore (en décibel) est une donnée courante (par exemple sur les notices des appareils hifi, des appareils ménagers, des moteurs...), mais il est très rarement explicité qu'il s'agit d'une grandeur logarithmique.

Lorsque la télévision est allumée, le niveau sonore du salon est 65 dB, car le bruit de fond du salon (30 dB) est masqué par le bruit de la télévision (65 dB).

L'**activité 2** aborde la notion d'échelle logarithmique avec la définition du niveau d'intensité sonore, l'**activité 3** retrouve cette notion avec la magnitude d'un séisme.

SITUATION 3

Cette situation permet de vérifier que les notions de sources et de détecteurs d'ondes sont acquises.

Le microphone est une source d'ondes sonores, le casque un détecteur.

Autre émetteur acoustique : les cordes vocales de la chanteuse.

Autre détecteur acoustique : les oreilles de la chanteuse.

L'**activité 4** permet la mise en œuvre d'un dispositif de détection sonore, l'**activité 3** s'intéresse à la détection des ondes sismiques.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

Les ondes dans la matière

p. 32

1. 2. et 3.

	Onde sonore	Houle	Onde sismique
Origine de la perturbation	Les vibrations de la membrane du boomer	Le vent de haute mer	La rupture de la faille d'Enriquillo
Milieu matériel perturbé	L'air	L'eau	La Terre
Manifestation de la perturbation	Compressions et dilatations des couches d'air (vu en Seconde)	Déplacement vertical de la surface de l'eau	Vibrations de la croûte terrestre

4. L'onde sonore, en faisant vibrer de proche en proche les couches d'air (faible déplacement local du milieu matériel), atteint la flamme de la bougie, mais sans courant d'air de la source à la flamme (courant qui éteindrait la flamme). De même, la houle atteint le flotteur de la bouée houlomotrice, sans qu'il y ait de courant marin, et enfin l'onde sismique arrive à Port-au-Prince sans coulée de boue.

Conclusion : après avoir été créée, une perturbation se déplace en s'éloignant de la source. Lors de son passage, des éléments du milieu subissent de petits déplacements locaux et éphémères, mais il n'y a pas de transport global de matière.

5. L'onde sonore fait vibrer la flamme de la bougie, la houle soulève le flotteur de la bouée houlomotrice pour produire de l'énergie électrique, et l'onde sismique détruit les constructions de Port-au-Prince.

Conclusion : la perturbation transporte de l'énergie.

ACTIVITÉ 2

Niveau d'intensité sonore

p. 33

1. a. Les vibrations des ailes d'un moustique, des branches d'un diapason, de la membrane d'un haut-parleur ou d'un tambour, d'un moteur, de la corde d'une guitare, de l'anche d'un saxophone, sont des émetteurs d'ondes sonores.

b. Une énergie par unité de temps est une puissance. Dans le Système International d'unité, la puissance s'exprime en watt (W) et une surface en m^2 , donc l'intensité sonore s'exprime en $W \cdot m^{-2}$.

2. D'après la figure 2 :

a. L'intensité sonore du seuil d'audibilité dépend fortement de la fréquence du son, le maximum de sensibilité de l'oreille se situant vers 3 kHz.

b. La valeur minimale est $I_{\min} = 5 \times 10^{-13} W \cdot m^{-2}$ et la valeur maximale est $I_{\max} = 10 W \cdot m^{-2}$.

Donc $I_{\max}/I_{\min} = 10/10^{-12} = 10^{13}$: l'étendue des valeurs de l'intensité sonore des sons audibles est donc très grande.

3. a. La valeur minimale est :

$$L_{\min} = 10 \log(I_{\min}/I_0) = 10 \log 0,5 = -0,3 \text{ dB}$$

et la valeur maximale est :

$$L_{\max} = 10 \log(I_{\max}/I_0) = 10 \log 10^{13} = 130 \text{ dB.}$$

L'étendue des valeurs du niveau d'intensité des sons audibles est donc beaucoup moins grande que celle des intensités sonores.

b.

$I (W \cdot m^{-2})$	I_0	$4,0 \times 10^{-4}$	$8,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-9}$
$L \text{ (dB)}$	0	86	89	60	63	30

$$4. L_2 = 10 \log(I_2/I_0) = 10 \log(2I_1/I_0) = 10 \log 2 + 10 \log(I_1/I_0) = 3 + L_1.$$

$$L_3 = 10 \log(I_3/I_0) = 10 \log(10I_1/I_0) = 10 \log 10 + 10 \log(I_1/I_0) = 10 + L_1.$$

5. a. Les niveaux d'intensité, contrairement aux intensités sonores, sont des grandeurs logarithmiques, qui ne peuvent donc pas s'additionner (ou se soustraire) comme des nombres.

b. Le premier schéma correspond à la question 3. c. : les deux véhicules ont la même intensité sonore, donc le niveau d'intensité sonore augmente de 3 dB lorsque l'intensité sonore est multipliée par deux.

Pour le deuxième schéma : l'intensité sonore du vélo est $I_1 = 1,0 \times 10^{-9} W \cdot m^{-2}$ et celle de la voiture $I_2 = 1,0 \times 10^{-6} W \cdot m^{-2}$ (réponse question 3. b.), donc l'intensité de l'ensemble est $I = I_1 + I_2 = 1,001 \times 10^{-6} W \cdot m^{-2}$ soit un niveau sonore $L = 10 \log(I/I_0) = 60 \text{ dB}$.

Donc, lorsque la différence de niveau sonore entre deux sources simultanées est grande (en pratique dès qu'elle dépasse 10 dB), le niveau sonore résultant est égal au plus grand des deux : la source la plus forte masque l'autre.

c. Pour nos oreilles, le bruit provoqué par deux véhicules n'est pas deux fois plus fort que celui d'un véhicule seul (et heureusement), le bruit d'un vélo est masqué par celui d'une voiture, donc le niveau d'intensité acoustique rend mieux compte des sensations sonores que l'intensité sonore.

ACTIVITÉ 3

Les messages des ondes sismiques

p. 34

1. a. Les ondes sismiques se propagent à partir du foyer (lieu d'origine de la rupture des roches en profondeur) dans toutes les directions.

b. On distingue les ondes sismiques de volume (P et S) qui se propagent à l'intérieur du globe et les ondes de surface (Rayleigh et Love) qui se propagent parallèlement à sa surface. Seules les ondes de volume sont émises au foyer.

2. a. Les directions de propagation et de déformation sont perpendiculaires pour des ondes S (ondes de cisaillement) et colinéaires pour les ondes P (ondes de compression-dilatation).

b. Ondes mécaniques de compression-dilatation : ondes P. Ondes mécaniques de cisaillement : les ondes S.

3. a. La vitesse des ondes de volume dans le manteau du globe terrestre (profondeur inférieure à 2 900 km) augmente avec la profondeur, les ondes P se propagent plus rapidement que les ondes S.

b. À une profondeur de 2 900 km, la vitesse des ondes P chute brusquement, ce qui correspond au passage du manteau au noyau. Si la vitesse des ondes S s'annule, c'est que le noyau externe se comporte comme un liquide, ces ondes ne se propagent que dans les solides.

4. Les ondes mécaniques suivent les mêmes lois de propagation que les ondes électromagnétiques, donc :

a. les ondes ne se propagent en ligne droite que dans un milieu homogène, comme la composition du globe change avec la profondeur, les ondes S et P ont des trajets non rectilignes ;

b. lorsque les ondes S et P arrivent à la surface de séparation entre deux couches (milieux de propagation très différents comme le manteau et le noyau), elles subissent des phénomènes de réflexion et de réfraction.

5. a. Les ondes P sont plus rapides que les ondes S (question 3. a.), elles arrivent donc avant les ondes S, d'où leur nom P pour premières, et S pour secondes.

Remarque : concordance avec le témoignage du géophysicien lors du séisme de Sendai. D'après le sismogramme (fig. 1), à Canberra, le décalage temporel entre les ondes P et S est $\Delta t = 10$ min. Ce décalage est d'autant plus grand que le sismogramme a été enregistré dans une station plus éloignée du foyer du séisme.

b. Si les ondes S et P se propageaient avec des vitesses constantes v_S et v_P , leur trajet serait rectiligne (voir question 4. a.) et la distance d entre le foyer du séisme et Canberra vérifierait $d = v_P \cdot (t_P - t_0)$ pour les ondes P et $d = v_S \cdot (t_S - t_0)$ pour les ondes S avec t_0 date du début du séisme au foyer, t_P et t_S dates d'arrivée des ondes P et S à Canberra.

On en déduit que $\Delta t = t_S - t_P = d \cdot (1/v_S - 1/v_P)$.

6. À Canberra, d'après la figure 1, les ondes P sont mieux détectées (plus grande amplitude du signal) dans la direction verticale, mais elles sont aussi observables sur les deux autres traces, c'est-à-dire dans le plan horizontal avec des signaux de plus faible amplitude. En effet, les ondes P sont des ondes de compression-dilatation, donc les déformations engendrées sont dans la direction de propagation. Cependant, cette direction n'est pas forcément verticale (fig. 4), les ondes se propageant dans toutes les directions à partir du foyer. Les vibrations du sol ont par conséquent une composante verticale, mais aussi des composantes horizontales.

7. a. Au foyer, l'énergie (en joule) libérée sous forme d'ondes sismiques vérifie :

$$\log E = 1,5 M + 4,32 \text{ avec } M = 8,9,$$

donc $\log E = (1,5 \times 8,9) + 4,32$, soit $E = 4,7 \times 10^{17}$ J.

L'énergie consommée en France en 2010 est :

$$E_F = 6,5 \times 10^{18} \text{ J},$$

donc l'énergie sismique libérée à Sendai représente 7 % de l'énergie consommée en France en 2010 ($E/E_F = 4,7 \times 10^{17} / (6,5 \times 10^{18}) = 7,2 \times 10^{-2}$).

b. L'énergie libérée E' pour une magnitude $M' = 7,8$ vérifie $\log E' = (1,5 \times 7,8) + 4,32$, soit $E' = 1,0 \times 10^{16}$ J. Donc $E/E' = 4,7 \times 10^{17} / (1,0 \times 10^{16}) = 47 > 30$.

8. a. L'analyse des sismogrammes permet d'accéder à de nombreuses informations comme la magnitude d'un séisme et sa localisation, mais aussi le trajet parcouru par les différents types d'ondes, la nature des terrains traversés...

b. La localisation et l'évaluation de la magnitude d'un séisme sont complexes, car le milieu de propagation des ondes n'est pas homogène, et par conséquent, la vitesse de propagation des ondes n'est pas constante, le trajet des ondes n'est pas rectiligne et en un lieu donné le sol tremble à cause des ondes de volume P et S, des ondes de surface (Love et Rayleigh), mais aussi des ondes résultant de phénomènes de réflexion et de réfraction.

Remarque : outre les secousses sismiques, les sismomètres enregistrent aussi les bruits de fond naturels des vents ou des vagues et les bruits des activités humaines.

c. La magnitude est une échelle logarithmique qui permet la comparaison des séismes avec des valeurs simples. L'échelle des énergies mises en jeu est beaucoup trop étendue.

ACTIVITÉ 4

Mesure de la célérité du son

p. 36

1. À partir de la source (le claquoir), le son émis se propage dans toutes les directions de l'espace. Pour déterminer la vitesse de propagation du son, il faut mesurer le temps de parcours du son dans une direction, celle définie par la source et les deux microphones.

2. a. La célérité du son étant $v = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, la durée de parcours vaut :

$$\Delta t = d/v = 1,00/340 = 2,94 \times 10^{-3} \text{ s}.$$

La durée de l'acquisition doit donc être supérieure à 3 ms.

b. Il faut synchroniser l'acquisition sur la voie reliée au microphone le plus près de la source.

c. Par exemple avec une carte d'acquisition, choisir une durée d'acquisition de 5 ms avec 300 mesures.

3. a. Chaque courbe représente la variation du signal reçue par un microphone en fonction du temps. On observe, hormis l'atténuation du signal, un décalage temporel Δt entre les deux courbes. Ce décalage est égal au temps de parcours Δt du son entre les deux microphones.

b. On mesure $\Delta t = 2,88 \text{ ms}$, d'où une valeur expérimentale de la célérité du son à température ambiante :

$$v_{\text{exp}} = 1,00 / (2,88 \times 10^{-3}) = 347 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

4. a. Les valeurs obtenues par les différents groupes de TP ne sont pas toutes identiques.

b. Sources d'erreurs possibles :

- mesure du décalage temporel ;
- la mesure de d ;
- la qualité des microphones...

A priori, la principale source d'erreur dans ce protocole est la mesure du décalage temporel.

c. La détermination du décalage temporel est plus précise, si on le mesure en repérant sur les deux courbes un pic caractéristique du signal plutôt qu'en cherchant le début du signal. Cependant, pour améliorer l'évaluation de la valeur de la célérité du son dans l'air ambiant, il faut réaliser plusieurs mesures.

5. a. Par exemple pour 18 mesures (ensemble des deux groupes de TP), on trouve $\bar{v} = 344 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et l'écart-type $\sigma = 6,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

b. On calcule la valeur moyenne parce qu'on admet qu'elle est la meilleure valeur à retenir pour la grandeur mesurée. L'écart-type permet d'évaluer la dispersion des mesures autour de la valeur moyenne.

c. L'intervalle de confiance à 95 % de la valeur vraie de la célérité v est $v = \bar{v} \pm \Delta v$ avec $\Delta v = 2\sigma/\sqrt{n}$. On a $\bar{v} = 344 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $\Delta v = 2 \times 6,7/\sqrt{18} = 3,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, soit $v = (344 \pm 3) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ou $v \in [341 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; 347 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}]$.

d. Précision de la mesure $\Delta v/v = 3/344 = 8,7 \times 10^{-3} \approx 1 \%$. Une précision de 1 % est tout à fait acceptable pour une mesure expérimentale.

6. a. Pour $T = 20 \text{ }^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$:

$$v_{\text{th}} = \sqrt{\frac{1,48 \times 8,314 \times 293}{29,0 \times 10^{-3}}} = 343 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

b. La valeur théorique se trouve bien dans l'intervalle de confiance.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : Connaître les manifestations des ondes mécaniques dans la matière

1. 1. b.

2. a et b.

3. b.

2. 1. *Faux.* La lumière est une onde électromagnétique.

2. *Vrai.*

3. *Faux.* Le vent est un transport de matière.

4. *Faux.* Une onde mécanique ne transporte pas de matière. Une onde mécanique à la surface de l'eau peut soulever temporairement et localement un objet flottant, mais pas le déplacer.

3. 1. On observe des rides circulaires qui semblent s'agrandir, et se déplacer en s'éloignant de plus en plus du point d'impact du caillou. Puis la surface de l'eau redevient comme avant la chute du caillou.

2. a. Les modifications temporaires de la surface de l'eau, engendrées par la chute du caillou, vont faire oscil-

ler verticalement le flotteur. Puis il retrouve sa position initiale.

b. La perturbation lors de sa propagation modifie localement et temporairement les propriétés mécaniques de l'eau et engendre des variations d'énergies cinétique et potentielle.

3. Oui, il s'agit d'une onde mécanique car on observe la propagation d'une perturbation à la surface de l'eau (question 1), sans transport de matière (question 2).

4 Qu'est-ce qu'une onde ?

« Un comméragé part de Washington et atteint très rapidement New York, bien que pas un des individus qui prennent part à sa propagation ne fasse le voyage entre ces deux villes. Il y a deux mouvements tout à fait différents impliqués, celui de la rumeur qui va de Washington à New York, et celui des personnes qui ont répandu cette rumeur. Le vent, en passant sur un champ de céréales, fait naître une onde qui se propage à travers tout le champ. Ici encore, nous devons distinguer le mouvement de l'onde et le mouvement des plantes séparées, qui subissent seulement de petites oscillations. Nous avons tous vu des ondes qui se répandent en cercles de plus en plus larges quand une pierre est jetée dans un bassin d'eau. Le mouvement de l'onde est très différent de celui des particules d'eau. Les particules vont simplement de haut en bas. Le mouvement de l'onde est celui d'un état de la matière et non de la matière même. Un bouchon de liège flottant sur l'onde le montre clairement, car il se déplace de haut en bas en imitant le du mouvement réel de l'eau, au lieu d'être transporté par l'onde. »

Albert Einstein et Léopold Infeld, *L'Évolution des idées en physique*.

1. Quelle propriété des ondes est illustrée dans ce texte ? Ce texte montre que la propagation d'une onde mécanique s'accompagne de modifications locales du milieu matériel, mais sans transport de matière.

2. Quand une pierre est jetée dans l'eau d'un bassin :
a. dans quelle direction se propagent les ondes générées ? Les ondes se propagent à la surface de l'eau horizontalement dans toutes les directions, ce qui explique la formation de rides circulaires.

b. quelle est la direction de la déformation de la surface de l'eau ?

Les particules d'eau comme le bouchon se déplacent verticalement.

c. les ondes générées sont des ondes de compression ou de cisaillement ?

Il s'agit d'ondes de cisaillement car elles se propagent en provoquant un déplacement des éléments du milieu perpendiculairement à leur direction de propagation.

5 1. a. La première boule, écartée de sa position d'équilibre, acquiert de l'énergie mécanique sous forme d'énergie potentielle de pesanteur.

b. La vitesse de cette boule croît lorsqu'elle revient vers sa position d'équilibre, donc l'énergie mécanique acquise précédemment sous forme potentielle passe sous forme cinétique.

c. Juste après le choc avec la deuxième boule, elle s'immobilise dans sa position d'équilibre, elle a perdu toute l'énergie mécanique acquise lorsqu'elle a été soulevée.

2. a. Dans ce dispositif, on n'observe pas de transport de matière, les boules du milieu ne se déplacent pas horizontalement.

b. En revanche, il y a bien transport d'énergie mécanique parce que la dernière bille est soulevée.

COMPÉTENCE 2 : Comprendre l'émission et la détection d'une onde mécanique

6 1. b et c.

2. a.

7 1. Émetteurs d'onde mécanique : un haut-parleur. Détecteurs d'onde mécanique : un microphone, une oreille, un sismomètre.

2. Un émetteur d'onde mécanique apporte l'énergie nécessaire pour créer une perturbation dans un milieu matériel.

3. Un détecteur d'onde mécanique est sensible aux modifications des propriétés mécaniques du milieu matériel engendrées par l'onde.

8 1. Une explosion correspond à une libération brutale d'énergie qui met en vibration les couches d'air, d'où l'émission d'un son. Ce son est d'autant plus intense que l'énergie libérée par l'explosion est grande.

2. Si l'explosion est très forte, les couches d'air en contact avec le tympan provoquent une vibration trop importante de celui-ci, d'où sa rupture.

3. Une onde mécanique ne peut pas se propager dans l'espace qui n'est pas un milieu matériel.

10 1. Vrai. Sur l'oscillogramme, le retard Δt entre l'émission et la réception est de 2,0 divisions. Compte tenu d'un balayage horizontal de 1,0 ms/div, le retard est bien de 2,0 ms.

2. Faux. Pendant Δt l'onde sonore parcourt une distance L à la vitesse du son v , donc $L = v \cdot \Delta t$. Entre l'émetteur et le récepteur, l'onde fait un aller et un retour, donc ils sont placés à une distance $d = L/2 = v \cdot \Delta t/2$ de la paroi réfléchissante.

A.N. : $d = 340 \times 2,0 \times 10^{-3}/2 = 0,34 \text{ m} = 34 \text{ cm}$.

COMPÉTENCE 3 : Connaître et exploiter la relation liant le niveau d'intensité sonore à l'intensité sonore

11 1. Faux. Le niveau d'intensité sonore L d'un son d'intensité I est donné par la relation : $L = 10 \log(I/I_0)$.

2. Vrai.

3. Vrai.

4. Faux. C'est le niveau d'intensité sonore qui se mesure avec un sonomètre.

12 1. Lorsque l'intensité sonore I délivrée par une enceinte est multipliée par deux ($I' = 2I$), le niveau sonore correspondant augmente de 3 dB, c'est-à-dire :

$$L' = L + 3 \text{ dB},$$

$$\begin{aligned} \text{car } L' &= 10 \log(I'/I_0) = 10 \log(2I/I_0) \\ &= 10 \log 2 + 10 \log(I/I_0) = 3 + L. \end{aligned}$$

2. Lorsque le niveau sonore d'une musique augmente et passe de $L_1 = 70 \text{ dB}$ à $L_2 = 80 \text{ dB}$, l'intensité sonore I_1 correspondante est multipliée par 10, c'est-à-dire $I_2 = 10 I_1$, car $I_2 = I_0 \cdot 10^{L_2/10} = I_0 \cdot 10^{(L_1+10)/10} = I_0 \cdot 10^{L_1/10} \cdot 10^{10/10} = 10 \cdot I_1$.

14 1. Un niveau d'intensité sonore se mesure avec un sonomètre.

2. Lorsque les deux musiciens jouent ensemble, l'intensité sonore est $I' = 2I$, donc le niveau sonore correspondant est :

$$\begin{aligned} L' &= 10 \log(I'/I_0) = 10 \log(2I/I_0) \\ &= 10 \log 2 + 10 \log(I/I_0) = 3 + L, \end{aligned}$$

soit $L' = 70 + 3 = 73 \text{ dB}$.

15 Le sonomètre mesure le niveau d'intensité sonore. Or, contrairement aux intensités sonores, les niveaux d'intensité sonore ne s'additionnent pas, car ce sont des grandeurs logarithmiques, donc la valeur 252 dB est à écarter ($252 = 62 + 65 + 61 + 64$).

D'autre part, le niveau d'intensité sonore mesuré lorsque les quatre musiciens jouent ensemble ne peut pas être inférieur à celui mesuré lorsqu'un musicien joue seul, donc la seule valeur correcte est 69 dB.

16 1. a. $L_1 = 10 \log(I_1/I_0)$ d'où $I_1 = I_0 \cdot 10^{L_1/10}$. De même, $I_2 = I_0 \cdot 10^{L_2/10}$.

b. $I_1 = 1,0 \times 10^{-12} \times 10^{65/10} = 3,2 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ et $I_2 = 1,0 \times 10^{-12} \times 10^{60/10} = 1,0 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

2. Lorsque les deux sources fonctionnent simultanément : $I = I_1 + I_2$ soit $I = 4,2 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Le niveau sonore est alors $L = 10 \log(I/I_0)$ soit :

$$L = 10 \log(4,2 \times 10^{-6}/(1,0 \times 10^{-12})) = 66 \text{ dB}.$$

17 1. Lorsque les deux sources fonctionnent simultanément, les intensités sonores s'ajoutent, mais pas les niveaux d'intensité sonore.

La machine de niveau d'intensité sonore $L_1 = 81$ dB a une intensité sonore $I_1 = I_0 \cdot 10^{L_1/10}$, celle de niveau d'intensité sonore $L_2 = 87$ dB une intensité sonore $I_2 = I_0 \cdot 10^{L_2/10}$.
 A.N. : $I_1 = 1,0 \times 10^{-12} \times 10^{81/10} = 1,2 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ et $I_2 = 1,0 \times 10^{-12} \times 10^{87/10} = 5,1 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Lorsque les deux sources fonctionnent simultanément, l'intensité sonore est $I = I_1 + I_2$.

Soit $I = 1,2 \times 10^{-4} + 5,1 \times 10^{-4} = 6,3 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Et le niveau d'intensité sonore est $L = 10 \log(I/I_0)$, soit :

$$L = 10 \log(6,3 \times 10^8) = 88 \text{ dB.}$$

2. a. $L_1 = 90$ dB et $L_2 = 93$ dB, donc $\Delta L = L_2 - L_1 = 3$ dB. Sur le graphique, on lit que pour une différence de niveau sonore de 3 dB entre deux sources (valeur portée en abscisse), il faut ajouter 1,8 dB (valeur lue en ordonnée) au niveau le plus élevé, pour avoir le niveau sonore de l'ensemble des deux marteaux-piqueurs, soit :

$$L = 93 + 1,8 = 95 \text{ dB.}$$

b. Lorsque deux machines identiques fonctionnent en même temps, $\Delta L = 0$ dB. D'après le graphique, il faut ajouter 3 dB, donc l'ensemble des deux machines a un niveau d'intensité sonore $L = 81 + 3 = 84$ dB.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

18 1. Cet appareil permettait de détecter la présence et probablement la direction d'une secousse.

2. À la différence des sismomètres actuels, celui-ci ne pouvait déterminer ni la durée des secousses, ni la distance et la magnitude du séisme. Il semble aussi difficile de pouvoir avec cet appareil, différencier les différentes ondes sismiques (P, S...).

19 1. a. L'onde ultrasonore est une onde mécanique, car « la perturbation se propage de proche en proche dans l'ensemble du fluide ».

b. Il s'agit d'une onde de compression, car « les déplacements du disque provoquent des successions de dépressions-surpressions du liquide qui est en son contact », les éléments du milieu se déplacent donc dans la même direction que la perturbation.

2. a. L'énergie nécessaire à la création de l'onde ultrasonore dans le fluide est apportée par l'émetteur qui se présente sous la forme d'un disque, constitué d'un matériau piézoélectrique sur les faces duquel sont déposées deux électrodes métallisées.

b. Un matériau piézoélectrique est un matériau susceptible de se déformer (dilatation et contraction) lorsqu'il est soumis à une tension électrique.

Remarque : « piézo » vient du grec « πῖεζειν » qui signifie presser, appuyer.

3. Sur son passage, l'onde ultrasonore de forte puissance modifie notablement la pression du liquide. Dans une zone de dépression, la pression est localement très infé-

rieure à la pression moyenne régnant dans le liquide, donc la température d'ébullition du liquide diminue, ce qui entraîne la vaporisation locale du liquide, d'où l'apparition de microbulles de vapeur.

Les microbulles ainsi formées se retrouvent très rapidement dans une zone de surpression (propagation de proche en proche de la perturbation), ce qui entraîne immédiatement leur implosion, puisque la pression du liquide devient bien supérieure à la pression à l'intérieur de la bulle de vapeur.

20 1. a. Pour communiquer entre eux, les éléphants utilisent les ondes sonores qui se propagent dans l'air, mais aussi les ondes sismiques qui se propagent dans le sol terrestre.

b. Les éléphants émettent (en frappant le sol) et réceptionnent les ondes sismiques (qui se propagent dans le sol) avec leurs pieds et les ondes sonores (qui se propagent dans l'air) avec leurs oreilles.

2. a. La vitesse des ondes sismiques traverse des milieux différents, ce qui explique que leur valeur peut varier entre 248 à $264 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

b. La durée Δt mise par les ondes sismiques pour parcourir une distance $L = 32,0$ km à la vitesse v est donnée par $\Delta t = L/v$, donc pour $248 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} < v < 264 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, alors $121 \text{ s} < \Delta t < 129 \text{ s}$.

c. Les ondes aériennes se propagent à la vitesse $v = 3,43 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, donc $\Delta t = 93,3$ s.

Remarque : on trouve bien que les ondes sismiques sont plus lentes que les ondes sonores.

3. a. La portée des ondes est la distance qu'elles peuvent atteindre. Donc d'après le texte, les ondes sismiques peuvent être détectées en des points plus éloignés de leur source que les ondes sonores aériennes. *Remarque :* les ondes ont une plus grande portée lorsqu'elles subissent moins d'amortissement dans le milieu de propagation.

b. Les ondes sismiques sont intéressantes pour la communication des éléphants, car bien qu'elles soient plus lentes que les ondes sonores aériennes, elles permettent de communiquer sur des distances plus grandes (une meilleure portée).

21 Les vagues déferlantes remplissent le réservoir. Le niveau de l'eau dans le réservoir est alors situé au-dessus du niveau de l'eau de la mer : la masse d'eau dans le réservoir possède donc de l'énergie potentielle de pesanteur. Puis l'eau s'écoule dans la conduite, l'énergie potentielle de pesanteur de l'eau diminue et se transforme en énergie cinétique. L'écoulement de l'eau dans la conduite met en rotation la turbine. L'énergie mécanique de la turbine est ensuite convertie en énergie électrique (par un alternateur).

22 1. a. Les ondes sismiques provoquent le soulèvement ou l'effondrement d'une partie du fond océanique, ces ondes se propagent dans la terre. L'information est ensuite transportée par ondes sonores dans l'eau jusqu'à la bouée, puis par ondes électromagnétiques dans l'atmosphère terrestre jusqu'à Hawaï.

b. Les ondes sismiques et sonores sont des ondes mécaniques qui ne peuvent se propager que dans un milieu matériel, ce qui n'est pas le cas des ondes électromagnétiques.

2. a. $\Delta t = d/v_{\text{eau}}$, soit :

$$\Delta t = 3,0 \times 10^3 / (1,5 \times 10^3) = 2,0 \text{ s.}$$

b. $\Delta t' = D/c$, soit :

$$\Delta t' = 3,6 \times 10^7 / (3,0 \times 10^8) = 0,12 \text{ s.}$$

c. La durée du trajet satellite-Hawaï est du même ordre de grandeur que $\Delta t'$, la durée du trajet bouée-satellite. Comme $\Delta t' \ll \Delta t$, l'ordre de grandeur du temps séparant la détection du tsunami et le déclenchement de l'alerte est d'environ 2 s. Le dispositif est efficace car l'arrivée sur les côtes des vagues du tsunami nécessite plusieurs minutes à plusieurs heures, ce qui permet de prévenir *a priori* les populations.

23 1. a. L'intensité sonore vaut $I = I_0 \cdot 10^{L/10}$ avec $L = 78 \text{ dB}$, donc $I = 1,0 \times 10^{-12} \times 10^{78/10} = 6,3 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

b. $I = P/4\pi r^2$ donc la puissance sonore P de cette machine vaut $P = 4\pi \cdot r^2 \cdot I$, soit :

$$P = 4\pi \times 1,0^2 \times 6,3 \times 10^{-5} = 7,9 \times 10^{-4} \text{ W.}$$

2. a. À $r' = 0,40 \text{ m}$ de cette machine, l'intensité sonore est $I' = P/(4\pi r'^2)$.

Le niveau d'intensité sonore est :

$$L' = 10 \log(I'/I_0) = 10 \log(P/4\pi \cdot r'^2 \cdot I_0)$$

soit $L' = 10 \log(7,9 \times 10^{-4} / (4\pi \times 0,4^2 \times 1,0 \times 10^{-12})) = 86 \text{ dB}$.

b. Le port d'un casque antibruit est obligatoire pour l'ouvrier car $L' > 85 \text{ dB}$.

24 Soient deux magnitudes M et M' sur l'échelle de Richter avec $M' - M = 1$.

$M' = \log A' + C$ et $M = \log A + C$, donc :

$$\log A' - \log A = 1, \text{ d'où } \log(A'/A) = 1 \text{ et } A'/A = 10 :$$

l'augmentation d'une unité de la magnitude sur l'échelle de Richter correspond à la multiplication par 10 de l'amplitude des ondes P.

25 1. a. On appelle onde mécanique le phénomène de propagation d'une perturbation sans transport de matière.

b. Pendant la durée Δt , c'est-à-dire entre l'émission et la réception, l'onde ultrasonore parcourt une distance $2L$ (aller et retour) à la vitesse du son dans l'air v , donc :

$$\Delta t = 2L/v.$$

c. D'après le schéma, $D = L + H$, soit $H = D - L$, or $L = v \cdot \Delta t/2$ (question 1. b.), d'où $H = D - (v \cdot \Delta t/2)$.

2. D'après la question 1. c., $\Delta t_1 = [2(D - H)]/v$.

La valeur de H est lue dans le tableau. À 15 h 52 le 31 juillet 2005 à Fort-Mahon, la hauteur d'eau à marée basse vaut $H = 3,20 \text{ m}$.

L'énoncé donne la valeur de $D : 10,0 \text{ m}$.

On en déduit que :

$$\Delta t_1 = [2 \times (10,0 - 3,20)]/340 = 4,00 \times 10^{-2} \text{ s.}$$

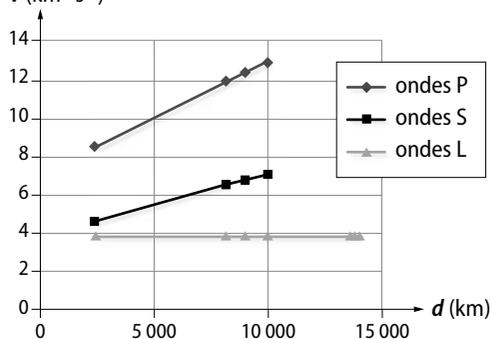
3. a. Au Cap-Ferret, l'installation est identique à celle de Fort-Mahon, donc la distance D est la même. Si pour la même hauteur d'eau H , les durées Δt mesurées sont différentes, c'est que la vitesse du son n'est pas la même.

b. La célérité des ondes ultrasonores dépendant de la température, il est donc nécessaire de déterminer celle-ci précisément à l'aide d'un capteur de température dans le marégraphe

26 1. a. $t_0 = 05 \text{ h } 46 \text{ min } 23 \text{ s.}$

	Station	Taiwan	Canberra	Beyrouth	Marseille
	Distance d (km)	2454	8178	9037	9986
Ondes P	t_p (h:min:s)	05:51:16	05:57:53	05:58:36	05:59:20
	$t_p - t_0$ (s)	293	690	733	777
	v_p (km · s ⁻¹)	8,38	11,85	12,33	12,85
Ondes S	t_s (h:min:s)	05:55:18	06:07:23	06:08:46	06:10:10
	$t_s - t_0$ (s)	535	1260	1343	1427
	v_s (km · s ⁻¹)	4,59	6,49	6,73	7,00
Ondes L	t_l (h:min:s)	05:57:08	06:22:12	06:26:01	06:30:11
	$t_l - t_0$ (s)	645	2149	2378	2628
	v_l (km · s ⁻¹)	3,80	3,81	3,80	3,80

b. v (km · s⁻¹)



2. a. et b. On retrouve que les ondes P sont les plus rapides et les ondes de surface les plus lentes.

D'autre part, la vitesse moyenne des ondes de surface garde une valeur constante, elle ne dépend pas de la station de détection, autrement dit de la distance parcourue. Comme ces ondes sont guidées par la surface du sol, on peut en déduire une certaine homogénéité du milieu de propagation (croûtes océaniques et continentales).

Au contraire, la vitesse moyenne des ondes P et S augmente avec la distance parcourue. Ce que l'on peut relier au fait que la vitesse de ces ondes de volume augmente avec la profondeur du manteau du globe terrestre qui est un milieu non homogène (voir figure 3 de l'activité 3).

c. Les ondes P et S n'ont pas des trajets rectilignes, car elles se propagent dans un milieu non homogène (la composition du globe change avec la profondeur), la longueur parcourue par ce type d'onde dans la Terre ne correspond pas à la distance entre l'épicentre du séisme et la station de détection (voir figure 4 de l'activité 3).

EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

27 1. Les ultrasons se propagent de A vers B à la vitesse $v + u$, donc la durée du trajet est $\Delta t_1 = L/(v + u)$.

2. Les ultrasons se propagent de B vers A à la vitesse $v - u$, donc la durée du trajet est $\Delta t_2 = L/(v - u)$.

3. Donc $\tau = \Delta t_2 - \Delta t_1 = [L/(v - u)] - [L/(v + u)]$
 $= [L \cdot (v + u) - L \cdot (v - u)] / [(v - u) \cdot (v + u)]$
 $= 2u \cdot L / (v^2 - u^2)$.

4. Si la vitesse u d'écoulement du fluide est négligeable devant la vitesse v des ultrasons dans le fluide, il en est de même de u^2 devant v^2 , donc $v^2 - u^2 \approx v^2$, d'où :

$$\tau = 2u \cdot L / (v^2 - u^2) \approx 2u \cdot L / v^2.$$

On en déduit que $u \approx (\tau \cdot v^2) / (2L)$.

5. A.N. : pour $L = 2,00 \text{ m}$, $v = 1,5 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $\tau = 5,0 \mu\text{s}$, on trouve :

$$u \approx [5,0 \times 10^{-6} \times (1,5 \times 10^3)^2] / (2 \times 2,00) = 2,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Remarque : on vérifie bien que $u \ll v$.

Caractéristiques des ondes

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
<p>Caractéristiques des ondes</p> <ul style="list-style-type: none"> – Ondes progressives. Grandeurs physiques associées. Retard. – Ondes progressives périodiques, ondes sinusoïdales. – Ondes sonores et ultrasonores. – Analyse spectrale. Hauteur et timbre. 	<ul style="list-style-type: none"> – Définir une onde progressive à une dimension. – Connaître et exploiter la relation entre retard, distance et vitesse de propagation (célérité). – <i>Pratiquer une démarche expérimentale visant à étudier qualitativement et quantitativement un phénomène de propagation d'une onde.</i> – Définir, pour une onde progressive sinusoïdale, la période, la fréquence et la longueur d'onde. – Connaître et exploiter la relation entre la période ou la fréquence, la longueur d'onde et la célérité. – <i>Pratiquer une démarche expérimentale pour déterminer la période, la fréquence, la longueur d'onde et la célérité d'une onde progressive sinusoïdale.</i> – <i>Réaliser l'analyse spectrale d'un son musical et l'exploiter pour en caractériser la hauteur et le timbre.</i>

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Étudier le phénomène de propagation d'une onde.
2. Décrire une onde progressive sinusoïdale.
3. Analyser une onde sonore.

Évaluation diagnostique

p. 48

SITUATION 1

Le vent ne peut pas être considéré comme une onde, car il transporte de la matière, les molécules d'air. En revanche, ce vent crée la déformation en surface de la mer, et crée des ondes. L'**activité 1** permet de revenir sur les caractéristiques des ondes mécaniques et d'introduire les notions de vitesse de l'onde et de directions de propagation et de déformation afin de définir les ondes longitudinales ou transversales.

SITUATION 2

L'oreille est capable de différencier deux instruments de musique. Cette différence est liée au timbre du son, alors que la fréquence d'une note est associée à sa hauteur. Timbre et hauteur caractérisent un son musical, ce qui est abordé dans l'**activité 2**, par l'intermédiaire des enregistrements de notes identiques mais jouées

par des instruments différents, et par l'analyse de leur spectre en fréquence.

SITUATION 3

La période a pour valeur $T = 20$ ms. La relation entre période et fréquence, ainsi que la mesure d'une période sur un oscillogramme ou sur toute autre représentation est à connaître avant d'aborder les **activités 2, 3 et 4**.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

La « ola »

p. 50

1. a. La perturbation est créée par quelques spectateurs voisins, qui se lèvent ensemble, tendent leur bras et qui se rassient ensuite. La perturbation n'a plus qu'à se déplacer de proche en proche dans le stade.

b. Le milieu de propagation est constitué par les spectateurs.

c. Il n'y a pas transport de matière car les spectateurs gardent leur place.

2. a. La durée des trois olas est celle du temps de repos au changement de côté, soit 1 minute et trente secondes. Une ola dure donc 30 secondes.

b. Le périmètre du court est de 280 mètres. La vitesse moyenne est donc $v = 280/30 = 9,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. a. La perturbation suit le contour du stade.

b. Les spectateurs, qui créent la perturbation, se déplacent perpendiculaire au sol du central.

c. La propagation est donc transversale.

4. a. La ola peut être considérée comme une onde mécanique progressive puisque la perturbation locale se propage dans un milieu matériel, sans transport de matière. La ola est en fait un « soliton » ou une onde solitaire, qui se propage sans se déformer.

b. Cette onde est caractérisée par sa dimension (celle du stade), par la direction de la perturbation par rapport à la propagation de l'onde (transversale ici) par sa vitesse ou célérité.

ACTIVITÉ 2

Donnons le la

p. 51

1. a. Cette onde est périodique et sinusoïdale.

2. a. et b. On compte sur la durée de l'enregistrement le maximum de périodes. Ici, on a 4 périodes pour une durée de 9,10 ms, soit $T = 9,10 \times 10^{-3}/4 = 2,28 \times 10^{-3} \text{ s}$. La fréquence est $f = 1/T = 440 \text{ Hz}$.

3. Cette valeur est la même que celle donnée par le spectre de fréquences. Ce nombre 440 correspond donc à la fréquence de cette note, le la_3 .

4. Ces signaux sont périodiques, même si leur amplitude diminue légèrement au cours du temps. On peut les qualifier de pseudo-périodiques.

5. a. et b. La période et la fréquence sont identiques à celle du diapason. La note jouée est donc la même.

6. Cette fréquence est la première (la plus petite) sur le spectre, elle a de plus l'amplitude la plus importante.

7. a. Pour le piano, on mesure des pics pour des fréquences voisines de 880 Hz, 1 320 Hz et 2 200 Hz.

Pour la flûte, les fréquences sont proches de 880 Hz, 1 320 Hz, 1 760 Hz et 2 200 Hz.

b. Ces fréquences sont des multiples entiers de la fréquence $f = 440 \text{ Hz}$. Elles sont appelées les harmoniques, alors que f est la fréquence dite fondamentale.

8. a. Un son pur ne vibre qu'à une seule fréquence, il est donc sinusoïdal.

b. Un son complexe n'est pas sinusoïdal, c'est une onde composée d'une fréquence fondamentale et de ses harmoniques.

ACTIVITÉ 3

Le coup du fil de téléphone

p. 52

1. Le côté ouvert du premier gobelet est mis près d'un haut-parleur relié au GBF et à la voie 1 de l'oscilloscope. Le fil est noué à l'intérieur de ce premier gobelet, puis

tendu et fixé à l'aide d'un nœud coulant à l'intérieur du deuxième gobelet. Le côté ouvert de ce gobelet est approché d'un microphone relié à la voie 2 de l'oscilloscope.

On choisit un microphone moyennement sensible aux basses fréquences, afin d'être sûr de mesurer le son transmis par le fil et pas par l'air.

On peut prévoir un deuxième dispositif pour l'autre fil, sinon il faut changer le fil.

2. a. Ces deux signaux ont même période.

Pour $f = 300 \text{ Hz}$, $T = 3,33 \text{ ms}$.

b. et c. Les fréquences f et f' sont identiques.

3. Le son est amorti au cours de sa propagation, l'amplitude de la perturbation diminue donc en s'éloignant du premier gobelet.

4. a. Pour un fil en laine, on trouve $\ell = 2,70 \text{ m}$.

b. La vitesse est $v = \ell/T = \ell \cdot f = 810 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

5. a. et b. Avec un fil de pêche, l'amplitude pour une même longueur de fil est plus importante, sa vitesse est de l'ordre de $1\,100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

6. a. et b. À 25°C , la valeur connue à cette époque de la vitesse du son dans l'air est de $448 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. La valeur de la vitesse de la lumière dans l'air n'est par contre pas connue à cette époque ! Les propos de M. Hooke sont donc contestables.

7. Le fil de pêche permet d'obtenir un son d'amplitude plus élevée qui se déplace plus rapidement que dans le fil en laine, il est donc préférable d'utiliser ce type de fil.

ACTIVITÉ 4

Des ondes de longueur variable

p. 53

1. a. et b. Sur certains émetteurs d'ultrasons la fréquence peut être réglée par le biais d'un GBF, sur d'autres elle varie de 38,5 à 41,5 kHz. Les fréquences f_1 et f_2 sont donc égales à ces valeurs.

2. Oui, ce sont des ultrasons de faibles fréquences.

3. Ces fréquences sont identiques.

5. La courbe se déplace sur l'axe des temps, puisque le signal pour atteindre le récepteur a besoin de plus de temps. De plus, l'amplitude du signal diminue pour une distance de quelques centimètres.

6. Ce retard correspond à une période visualisée sur l'écran de l'oscilloscope.

7. a. et b. Cette distance est faible, puisque pour $f_1 = 38,5 \text{ kHz}$, elle vaut 8,8 mm et pour $f_2 = 41,5 \text{ kHz}$, elle a pour valeur 8,2 mm. Il est donc préférable de mesurer plusieurs périodes (au moins dix) de retard sur l'écran de l'oscilloscope, pour déterminer une distance $d = 10 \lambda$.

8. a. et b. La célérité de cette onde ultrasonore est le rapport entre la distance parcourue pendant la durée du parcours, soit en prenant comme durée la valeur

d'une période, $v = \lambda/T = \lambda \cdot f$. La longueur d'une onde dépend donc de sa fréquence, si la célérité de celle-ci reste constante. On a $\lambda = v/f$, si la fréquence des ultrasons augmente, sa longueur d'onde diminue.

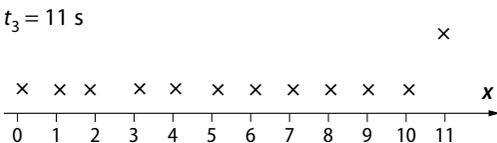
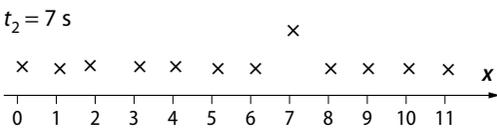
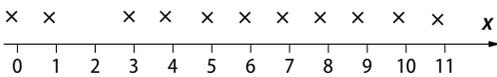
EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : Étudier le phénomène de propagation d'une onde

1. **Vrai.**
 2. **Faux.** Une perturbation à la surface d'une eau calme produit une onde progressive à deux dimensions.
 3. **Faux.** Le retard est la durée que met une perturbation à se propager entre deux points.
 4. **Faux.** La célérité d'une onde est sa vitesse de propagation dans le milieu où elle se propage.
 5. **Vrai.**
- 2 1. a. On peut parler d'onde progressive à une dimension car l'onde ne se propage que dans une direction. b. L'onde se déplace de gauche à droite, car $t' > t$.
 2. a. La durée τ représente la durée que met la perturbation pour aller du point M au point M'. b. Il faut connaître la vitesse v de propagation de la perturbation pour pouvoir la calculer. On a alors la relation $v = d/\tau$. c. Réponse **C**. d. τ est appelé retard de l'onde car le point M' subit, avec retard par rapport au point M, l'effet de la perturbation. e. On peut calculer ce retard si l'on connaît la vitesse de propagation de la perturbation : $\tau = d/v$.

- 3 1. a. La ola parcourt $d = 2$ m en $\Delta t = 2$ s, donc sa vitesse de propagation est de $v = d/\Delta t = 1$ m · s⁻¹. b. Comme la vitesse de l'onde est de 1 m · s⁻¹, le personnage placé en $x = 7$ m va se lever et s'asseoir avec un retard $\tau = d/v = 7$ s par rapport à l'instant initial.

2. a. et b. $t_1 = 2$ s.



3. La propagation de la ola simule la propagation d'une onde mécanique progressive, car il y a propagation d'une perturbation dans un milieu matériel sans transport de matière.

4 1. On détermine avec quel retard τ , par rapport au point A, le point B est atteint par le signal.

À cet effet, on lit à l'oscilloscope un retard :
 $\tau = 4 \text{ div} \times 5 \text{ ms} \cdot \text{div}^{-1} = 20 \text{ ms}$.

2. a. Par définition $v = D/\tau$.
- b. $v = 20/(20 \times 10^{-3}) = 1\,000$ m · s⁻¹.

5 1. Les directions de la propagation de l'onde et du mouvement d'un point de la corde sont perpendiculaires. On parle de ce fait d'onde transversale.

2. La règle blanche donne l'échelle du dessin. On mesure la distance parcourue par le front de l'onde : $d = 66$ cm.

3. $v = d/\Delta t = 0,66/0,165 = 4$ m · s⁻¹.

COMPÉTENCE 2 : Décrire une onde progressive sinusoïdale

- 6 1. a et c.
2. b et c.
3. a et b.

7 1. a. Les crêtes des vagues semblent régulièrement espacées.

b. Cette période spatiale s'appelle la longueur d'onde λ .

2. a. La durée qui sépare deux vagues successives pour le sauveteur est constante.

b. Cette périodicité temporelle s'appelle la période T .

3. $v = \lambda/T$.

8 1. a. La longueur d'onde λ est la plus petite distance qui sépare deux points qui vibrent en phase.

b. $v = \lambda/T = \lambda \cdot f$.

2. $AB = 3\lambda_1$ donc $\lambda_1 = 1$ cm.

$v_1 = \lambda_1 \cdot f_1 = 1 \times 8,0 = 8$ cm · s⁻¹.

3. $AB = 4\lambda_2$ donc $\lambda_2 = 0,75$ cm.

$v_2 = \lambda_2 \cdot f_2 = 0,75 \times 17 = 13$ cm · s⁻¹.

Comme $v_2 \neq v_1$ donc la célérité des ondes varie avec leur fréquence.

COMPÉTENCE 3 : Analyser une onde sonore

10 1. **Faux.** Une onde sonore nécessite un milieu matériel pour se propager.

2. **Vrai.** Les ultrasons sont des ondes sonores dont la fréquence est supérieure à 20 kHz.

3. **Vrai.**

4. **Vrai.**

5. *Faux*. La hauteur d'un son est liée à la fréquence du signal.

11 Observation 1 : les ondes sonores sont des ondes mécaniques.

Observation 2 : les ondes sonores sont des ondes longitudinales.

12 1. La hauteur du son correspond à la fréquence du signal périodique.

À l'aide du graphe, on voit que $3T = 0,024$ s.
D'où $T = 0,008$ s et $f = 1/T = 1/0,008 = 125$ Hz.

2. La première fréquence est le fondamental. Les trois autres fréquences sont les harmoniques.

3. Les deux sons ont la même hauteur (même fréquence du fondamental) mais un timbre différent (nombre et amplitudes des harmoniques différents).

13 Un violon jouant une note

Voici le spectre en fréquence d'un violon jouant une note (voir manuel).

1. Est-ce le spectre en fréquences d'un son complexe ?
Comme dans le spectre en fréquences, il y a plusieurs pics (plusieurs harmoniques), il s'agit d'un son complexe.

2. Quelle est la fréquence du fondamental ?
La fréquence du fondamental est $f_1 = 100$ Hz.

3. a. Quelle est la fréquence du second pic ?
La fréquence du deuxième harmonique est $f_2 = 200$ Hz.

b. Quelle est la relation entre la fréquence du fondamental et la fréquence du second pic ?
 $f_2 = 2 f_1$.

14 1. En utilisant l'enregistrement, on peut mesurer la durée de 3 périodes : $3T = 5,43$ ms.

On en déduit que $T = 1,81$ ms.
Donc $f = 1/T = 1/(1,81 \times 10^{-3}) = 552$ Hz.

Donc le mode fondamental de la corde correspond à la fréquence 552 Hz **C**.

2. Le spectre de fréquences correspondant au son émis par la corde de piano est le spectre **a**. En effet :
– le fondamental a pour fréquence 552 Hz ;
– le spectre de fréquences est celui d'un son complexe.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

15 1. a. Une onde mécanique est une onde qui se propage dans la matière (sans transport de matière).

b. L'onde sonore est une onde longitudinale, car la direction de la perturbation (compression et dilatation de la couche d'air) est la même que la direction de propagation de l'onde.

2. $v_{\text{exp}} = d/\tau = 9\,549,6 \times 1,949/54,6 = 341$ m · s⁻¹.

3. D'après le texte, pour les observateurs, la célérité du son dépend de la température.

4. Les observateurs déclenchent leur chronomètre à l'apparition de la lumière. Ils négligent la durée que met la lumière à leur parvenir. Cette approximation est raisonnable car la vitesse est de 3×10^8 m · s⁻¹, donc la durée de parcours est négligeable.

16 1. À l'aide des courbes obtenues, on peut mesurer la célérité de l'onde sonore en connaissant la distance parcourue par l'onde (on connaît la distance entre les microphones) et la durée mise par l'onde pour parcourir cette distance (on peut déterminer ce retard sur les enregistrements).

2. Pour la distance M_1M_2 :
 $v_A = M_1M_2/\tau_A = 2,00/(0,008 - 0,002) = 330$ m · s⁻¹.

Pour la distance M_2M_3 :
 $v_B = M_2M_3/\tau_B = 3,00/(0,017 - 0,008) = 330$ m · s⁻¹.

3. Oui, car $v_A = v_B$.

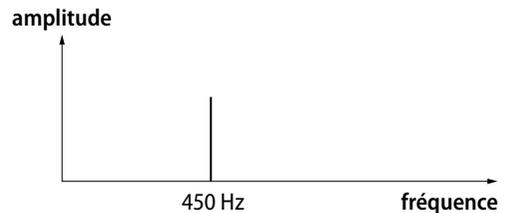
17 1. a. D'après les courbes obtenues, on peut déterminer la durée de 4 périodes :

$$4T = 9,0 \text{ ms, donc } T = 2,2 \text{ ms.}$$

b. La hauteur du son est sa fréquence :

$$f = 1/T = 450 \text{ Hz.}$$

2. a. Le spectre en fréquence est le spectre d'un son pur (car les courbes obtenues sont des sinusoides parfaites).



b. Le son émis par un diapason est un son pur, car son spectre de fréquences ne présente pas d'harmoniques.

3. En comptant plusieurs retours de phase, on améliore la précision de la mesure.

4. a. La longueur d'onde est la plus petite distance entre deux points qui vibrent en phase.

b. $5 \lambda = 3,86$ m donc $\lambda = 0,772$ m.

5. $v = \lambda/T = 0,772/(2,2 \times 10^{-3}) = 350$ m · s⁻¹.

18 1. Quand la direction de la perturbation est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde, on parle d'onde transversale. Quand la direction de la perturbation est la même que la direction de propagation, on parle d'onde longitudinale.

L'onde créée par la goutte d'eau sur la cuve à ondes est une onde transversale.

2. Si on a 24 images par seconde, la durée qui sépare deux images consécutives est de $1/24 = 0,042 = 42 \text{ ms}$.

• Pour $e_1 = 3 \text{ mm}$

De l'image 1 à l'image 7, la durée écoulée est de $\tau_1 = 42 \times 6 = 250 \text{ ms}$ (6 intervalles de temps).

$$c_1 = d_1/\tau_1 = 0,048/0,25 = 0,19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

• Pour $e_2 = 1 \text{ mm}$

De l'image 8 à l'image 14, la durée écoulée est de $\tau_2 = 42 \times 6 = 250 \text{ ms}$ (6 intervalles de temps).

$$c_2 = d_2/\tau_2 = 0,040/0,25 = 0,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

3. La célérité \odot de l'onde augmente quand l'épaisseur de l'eau diminue.

19 1. a. Les ultrasons sont des ondes sonores dont la fréquence est supérieure à 20 kHz.

b. Une onde ultrasonore est une onde sonore : elle se propage par une suite de compressions/dilatations de la matière. C'est donc une onde mécanique progressive.

2. a. Comme il existe un retard entre l'émission du signal par le récepteur et la réception de ce signal par le récepteur, le signal \odot correspond à l'émetteur et le signal \ominus au récepteur.

b. $\tau = 2,0 \text{ div} \times 1,0 \text{ ms} \cdot \text{div}^{-1} = 2,0 \text{ ms}$.

3. a. La vitesse du son dans l'air est $v = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. On en déduit la distance d qui sépare l'émetteur et le récepteur de la paroi réfléchissante, sachant que τ correspond à un aller-retour du signal :

$$v = 2d/\tau$$

donc

$$d = v \cdot \tau/2 = 340 \times 0,001 = 0,34 \text{ m} = 34 \text{ cm}.$$

b. Les ultrasons peuvent être utilisés pour mesurer des distances.

20 1. a. L'onde fait un aller-retour entre l'émetteur et le récepteur.

Donc $v = 2L/\Delta t$, d'où $\Delta t = 2L/v$.

b. $H = D - L = D - (v \cdot \Delta t/2)$.

2. À l'aide de l'enregistrement, on détermine $\Delta t = 2,2 \text{ ms}$. On en déduit que :

$$H = D - (v \cdot \Delta t/2) = 0,43 - (340 \times 2,2 \times 10^{-3}/2) = 0,056 = 5,6 \text{ cm}.$$

21 1. Ce son n'est pas un son pur mais un son complexe. En effet, son spectre en fréquences présente plusieurs harmoniques.

2. La hauteur du son émis est la fréquence du fondamental.

D'après l'enregistrement, on peut déterminer la valeur de 4 périodes :

$$4T = 8 \text{ ms}, \text{ donc } T = 2 \text{ ms},$$

donc $f = 500 \text{ Hz}$.

Ce qui est cohérent avec le spectre en fréquences.

3. On détermine la longueur d'onde correspondant au fondamental :

$$v = \lambda/T \text{ donc } \lambda = v \cdot T = 340 \times 2 \times 10^{-3} = 0,68 \text{ m} = 68 \text{ cm}.$$

22 La célérité de l'onde sonore dans l'air est de $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ à 20°C et $331 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ à 0°C , donc la célérité de l'onde sonore dépend de la température.

La célérité de l'onde sonore est, à 20°C , de $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dans l'air et de $1\,500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dans l'eau, donc la célérité de l'onde sonore dépend du milieu de propagation.

23 1. D'après le spectre en fréquence, la fréquence du fondamental est de 130 Hz, donc la note produite par la cloche est le do_2 .

2. L'espace entre les pics des différentes fréquences représentées sur le spectre en fréquence n'est pas un intervalle constant, donc la relation $f_n = n \cdot f_1$ ne s'applique pas ici.

3. Le spectre de la fontaine montre qu'une infinité de fréquences est présente. On ne peut pas y déterminer une fréquence fondamentale.

4. Ces deux phénomènes sonores ne sont pas des sons musicaux mais des bruits, car leurs spectres en fréquences ne présentent pas de fondamental et d'harmoniques.

EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

24 1. On remarque que la distance est la même entre deux zones claires successives qui correspondent à la distance entre deux points qui vibrent en phase. Autrement dit, la longueur d'onde λ est constante dans les zones de profondeur h et h' mais que $\lambda_h > \lambda_{h'}$. Comme $v = \lambda \cdot f$ et que f est constante, $v_h > v_{h'}$. Donc la célérité des ondes dépend de la profondeur de l'eau.

2. On observe un phénomène de réfraction au niveau du bord de la plaque.

3. $v = (g/2\pi) \cdot T = (g/2\pi)/f$.

$$v_1 = (g/2\pi)/f_1 = (9,8/2\pi)/5,0 = 0,31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$v_2 = (g/2\pi)/f_2 = (9,8/2\pi)/10 = 0,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

4. On excite sinusoidalement un point S à partir de l'instant $t = 0 \text{ s}$. On observe un point M à 10 m de S.

$$v = d/\Delta t \text{ donc } \Delta t = d/v.$$

a. $t_1 = d/v_1 = 10/0,31 = 32 \text{ s}$.

b. $t_2 = d/v_2 = 10/0,16 = 63 \text{ s}$.

Propriétés des ondes

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
<ul style="list-style-type: none"> - Diffraction. - Influence relative de la taille de l'ouverture ou de l'obstacle et de la longueur d'onde sur le phénomène de diffraction. - Cas des ondes lumineuses monochromatiques, cas de la lumière blanche. - Interférences. - Cas des ondes lumineuses monochromatiques, cas de la lumière blanche. Couleurs interférentielles. - Effet Doppler. 	<ul style="list-style-type: none"> - Savoir que l'importance du phénomène de diffraction est liée au rapport de la longueur d'onde aux dimensions de l'ouverture ou de l'obstacle. - Connaître et exploiter la relation $\theta = \lambda/a$. - Identifier les situations physiques où il est pertinent de prendre en compte le phénomène de diffraction. - <i>Pratiquer une démarche expérimentale visant à étudier ou utiliser le phénomène de diffraction dans le cas des ondes lumineuses.</i> - Connaître et exploiter les conditions d'interférences constructives et destructives pour des ondes monochromatiques. - <i>Pratiquer une démarche expérimentale visant à étudier quantitativement le phénomène d'interférence dans le cas des ondes lumineuses.</i> - <i>Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour mesurer une vitesse en utilisant l'effet Doppler.</i> - Exploiter l'expression du décalage Doppler de la fréquence dans le cas des faibles vitesses. - Utiliser des données spectrales et un logiciel de traitement d'images pour illustrer l'utilisation de l'effet Doppler comme moyen d'investigation en astrophysique.

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Étudier le phénomène de diffraction.
2. Étudier le phénomène d'interférences.
3. Utiliser l'effet Doppler.

Évaluation diagnostique

p. 66

SITUATION 1

L'objectif est de rappeler ce que l'on appelle lumière monochromatique en optique et la notion de longueur d'onde. On obtient un spectre constitué d'une seule raie. La lumière du laser est une lumière monochromatique caractérisée par sa longueur d'onde dans le vide ou sa fréquence. La diffraction et les interférences seront étudiées dans le cas des lumières monochromatiques dans les **activités 1, 2 et 3**.

SITUATION 2

L'objectif est ici d'introduire la notion d'interférences en se basant sur une utilisation de ce terme au quotidien.

Les interférences que l'on peut entendre sur un poste de radio à l'entrée des grandes villes résultent de la superposition de deux ondes électromagnétiques (de fréquences proches).

La définition et l'utilisation du phénomène d'interférences seront effectuées dans les **activités 3 et 4** dans le cas des ondes lumineuses.

SITUATION 3

L'objectif est d'introduire l'effet Doppler sur un exemple connu du quotidien.

Plus la voiture de Formule 1 s'approche du spectateur et plus le son paraît aigu : la fréquence du son perçu augmente. Lorsqu'elle s'éloigne, le son paraît de plus en plus grave, la fréquence du son diminue. On rencontre le même phénomène lorsque la sirène d'un camion de pompier s'approche puis s'éloigne d'un observateur fixe. Dans l'**activité 5**, on étudie l'effet Doppler sonore et dans l'**activité 6**, on applique l'effet Doppler-Fizeau à l'investigation en astrophysique.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

À la découverte de la diffraction

p. 68

1. Un rayon de lumière ?

1. On observe une tache centrale brillante et des taches plus petites et moins intenses autour réparties symétriquement. La figure de diffraction s'étale perpendiculairement à la direction de la fente.

2. Plus la fente est étroite, plus la figure de diffraction s'étale.

3. Non, on ne peut pas isoler un rayon de lumière car plus on restreint le faisceau laser et plus la lumière s'étale. Le rayon de lumière reste le modèle de propagation rectiligne de la lumière et n'a aucune réalité physique.

4. Non, la propagation rectiligne de la lumière n'est plus vérifiée dans cette expérience.

5. À la place d'une tache sur l'écran, on observe plusieurs taches d'intensité moindre, la lumière laser a bien été « mise en morceau » dans cette expérience.

2. Un problème de taille !

1. La longueur d'onde de l'onde mécanique est la distance entre deux maxima (minima) d'amplitude sur l'eau ou deux zones brillantes (sombres) en observation stroboscopique. Pour plus de précisions, on peut faire la moyenne sur toutes les longueurs d'onde présentes.

2. L'onde incidente est plane, l'onde diffractée est circulaire. Il y a un changement de la direction de propagation de l'onde. On observe des maxima et des minima d'amplitude sur la figure de diffraction.

La longueur d'onde est conservée lors du phénomène de diffraction.

3. La dimension e de l'écartement entre les obstacles doit être de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de l'onde incidente.

4. a. On constate que e est du même ordre de grandeur ou inférieur à la longueur d'onde de l'onde incidente.

b. La taille de l'obstacle doit être du même ordre de grandeur ou inférieure à la longueur d'onde de l'onde incidente pour que le phénomène de diffraction se manifeste.

ACTIVITÉ 2

Diffraction et mesure de longueur

p. 69

1. La lumière laser présente un danger pour l'œil. Pour éviter des brûlures irréversibles de la rétine, il ne faut pas regarder en direction de la source du faisceau.

2. Plus l'épaisseur du fil calibré est faible et plus la longueur de la tache centrale de diffraction augmente. Ces

deux dimensions semblent évoluer inversement l'une de l'autre.

Pour les mesures, voir tableau ci-dessous.

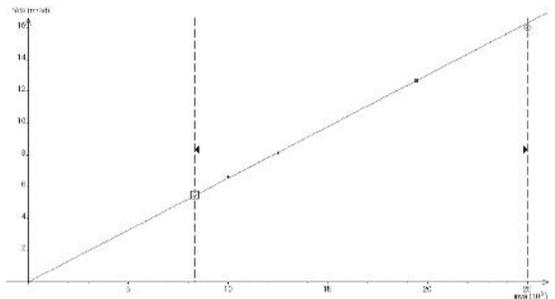
Ici, $D = 3,03$ m et $\lambda = 650$ nm.

3. a. On a $\tan \theta \approx \theta = (d/2)/D = d/2D$.

b.

a (μm)	d (cm)	θ (rad)	$1/a$ (m^{-1})
40	9,5	0,016	25 000
80	4,9	0,0081	12 500
100	4,0	0,006 6	10 000
120	3,3	0,005 5	8 333

4. On trace $\theta = f(1/a)$.



On obtient une droite qui passe par l'origine : θ est bien inversement proportionnel à a .

b. En modélisant la courbe par une droite, on obtient le coefficient directeur (donc coefficient de proportionnalité) $p = 6,52 \times 10^{-7} \text{ m} = 652 \text{ nm}$.

c. On constate qualitativement que plus λ augmente et plus la longueur de la tache centrale de diffraction augmente, donc plus θ augmente ($\theta = d/2D$ et D fixé). On trace ensuite $\theta = f(\lambda)$: on obtient une droite qui passe par l'origine, θ est donc proportionnel à λ .

d. On constate que le coefficient directeur de la droite $\theta = f(1/a)$ a pour valeur 652 nm, ce qui est, aux incertitudes de mesures près, égal à la longueur d'onde λ de la lumière de la diode laser (650 nm).

On conclut alors que $\theta = \lambda/a$.

5. On a $\tan \theta \approx \theta = (d/2)/D = d/2D = \lambda/a$, donc :

$$d = 2D \cdot \lambda/a.$$

6. a. Pour $D = 3,03$ m, on place un cheveu à la place des fils calibrés. On mesure la longueur de la tache centrale de diffraction, puis on calcule la valeur de θ dans l'approximation des petits angles. On reporte cette valeur sur la courbe, puis on lit l'abscisse correspondante.

Dans l'expérience réalisée, $d = 4,5$ cm, donc :

$$\theta = 7,4 \times 10^{-3} \text{ rad.}$$

On a $1/a = 11,4 \times 10^{-3}$ et $a = 88 \mu\text{m}$.

b. Voir conditions de l'expérience.

7. Voir expérience.

8. L'écart relatif s'évalue de la manière suivante :

$$\left(a_{\text{palmer}} - a_{\text{diffraction}} / a_{\text{palmer}} \right) \times 100.$$

ACTIVITÉ 3

Lumière + lumière = ?

p. 70

1. a. Lorsque la lumière passe par une fente de dimension inférieure ou égale à la longueur d'onde de la lumière, il y a diffraction de la lumière.

b. On constate, sur la figure de diffraction, des traits verticaux sombres qui apparaissent.

2. En lumière blanche, on observe une zone blanche au centre et des zones colorées qui l'entourent.

La figure possède un axe de symétrie situé au centre de la zone blanche.

3. Dans la première expérience, on peut dire que lumière + lumière = lumière et que lumière + lumière = obscurité. Dans la deuxième expérience, on peut aussi dire que lumière blanche + lumière blanche = lumières colorées.

4. a. Les zones dites d'interférences constructives correspondent aux zones lumineuses sur l'écran.

b. Les zones dites d'interférences destructives correspondent aux zones sombres sur l'écran.

5. a. Les « crêtes » et les « creux » des deux ondes coïncident : la superposition de ces deux ondes conduit à une onde ayant des crêtes et des creux d'amplitude deux fois plus importante, l'onde résultante est renforcée.

b. Par analogie avec la situation précédente, la position des deux ondes conduisant à des interférences destructives est la suivante : les crêtes d'une onde coïncident avec les creux de l'autre, les deux ondes en se superposant s'annulent.

6. Les interférences en lumière blanche conduisent à l'apparition de lumières colorées : on parle de couleurs interférentielles pour les distinguer de celles obtenues par absorption, diffusion ou dispersion qui ont des origines différentes.

ACTIVITÉ 4

Interférométrie

p. 71

1. Les interférences sont le résultat de la superposition de deux ondes de même nature et de même longueur d'onde.

2. On observe des zones brillantes et sombres espacées régulièrement sur un fond de tache de diffraction.

3. En un point de l'écran d'une zone brillante, les deux ondes lumineuses sont en phase, elles interfèrent de manière constructive. En un point d'une zone sombre sur l'écran, les ondes sont en opposition de phase, elles interfèrent de manière destructive.

4. L'espacement entre les fentes ℓ , la distance fente-écran D , la distance laser-fente d , la longueur d'onde de la lumière laser λ , sont les paramètres expérimentaux susceptibles d'influencer la figure d'interférences obtenue.

5. Pour $\ell = 0,20$ mm
Mesures : voir tableau ci-contre.

i (cm)	D (cm)
0,22	69,3
0,24	80,0
0,30	96,6
0,34	112,3
0,44	142,7
0,48	158,7

6. a. Influence de ℓ sur la valeur de i

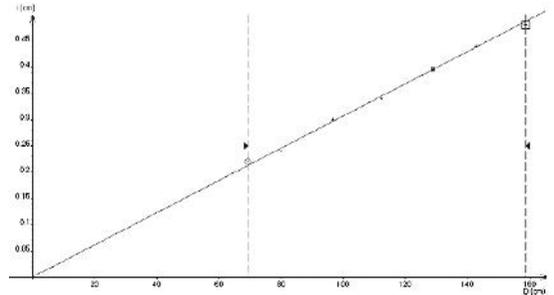
Le tracé de $i = f(1/\ell)$ est une droite qui passe par l'origine.

b. Influence de λ sur la valeur de i

Le tracé de $i = f(\lambda)$ est une droite qui passe par l'origine.

7. i dépend de D et à λ , et inversement proportionnel à ℓ . La formule correcte est $i = \lambda D / \ell$ (réponse b).

8. a.



b. La pente de la droite est telle que $p = \lambda / \ell$. En relevant la valeur de λ du laser, on peut calculer la valeur de l'espacement entre les deux fentes.

Ici, $\ell = \lambda / p = 650 \times 10^{-9} / 0,00307 = 2,1 \times 10^{-4} = 0,21$ mm.

c. $e = \left(\ell_{\text{mesurée}} - \ell_{\text{constructeur}} / \ell_{\text{constructeur}} \right) \times 100$
 $= (0,21 - 0,20 / 0,20) \times 100 = 5\%$.

L'écart relatif est faible, la valeur mesurée est en accord avec la valeur du constructeur.

9. La longueur d'onde de la lumière incidente, la distance entre les fentes et l'écran et l'écartement des fentes ont une influence sur la figure d'interférences.

10. La valeur de l'interfrange i dépend de la longueur d'onde de l'onde incidente. Il faut donc travailler à une longueur d'onde donnée pour exploiter la figure d'interférences.

ACTIVITÉ 5

Effet Doppler sonore

p. 72

1. a. Lorsque la source se rapproche de l'observateur, la longueur d'onde (distance entre deux fronts d'onde consécutifs) diminue, donc la fréquence augmente. La formule correspondante est la formule (2) car $v - u < v$, donc $v / (v - u) > 1$ et $f_r > f_e$.

b. Lorsque la source s'éloigne de l'observateur, la longueur d'onde (distance entre deux fronts d'onde consécutifs) augmente, donc la fréquence diminue. La formule correspondante est la formule (1) car $v + u > v$, donc $v/(v + u) < 1$ et $f_r < f_e$.

2. Le rapport des deux fréquences dépend uniquement de la vitesse de l'émetteur par rapport au récepteur (v étant une constante dans les conditions des expériences). La mesure du décalage en fréquence entre l'émission et la réception permet d'accéder à la valeur de la vitesse.

3. Sirène d'un camion de pompier : onde sonore. Échographie Doppler : ultrasons (réflexion sur les globules rouges).

Radar : onde électromagnétique type radio (réflexion sur le véhicule).

Vélocimétrie laser : onde électromagnétique type lumière (diffusion par les particules en suspension).

4. Pour $f = 6\,000$ Hz.

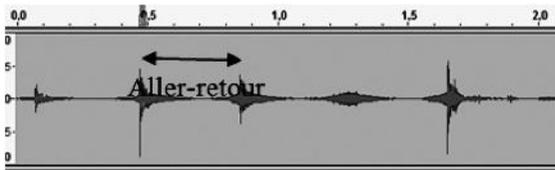
On mesure $f_e = 5\,996$ Hz.

Lors de la phase d'approche : $f_{ra} = 6\,016$ Hz.

Lors de la phase d'éloignement : $f_{re} = 5\,981$ Hz.

5. a. Les résultats sont bien en accord avec la question 1, on a bien $f_{ra} > f_e$ et $f_{re} < f_e$.

b. Pour l'aller : $v = 1,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et pour le retour : $v = 0,85 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, donc une vitesse moyenne $v = 1,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



6. a. Principe de la mesure (voir schéma) de Δt :

Ici, $\Delta t = 0,40$ s et $d = 40$ cm.

b. $v = d/\Delta t = 1,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

7. Ces deux valeurs sont équivalentes. On peut donc bien déterminer une vitesse dans la direction d'observation en mesurant la différence de fréquence entre l'émission et la réception, due à l'effet Doppler.

8. Oui, la mesure de vitesses par effet Doppler est applicable aux ondes sonores et électromagnétiques (voir réponse à la question 3).

9. On mesure la différence de fréquence entre l'émission et la réception de l'onde, puis on applique la formule correspondante à la situation.

ACTIVITÉ 6

Effet Doppler et astrophysique

p. 73

1. Les raies d'absorption sur le spectre des étoiles proviennent des éléments chimiques présents dans la couche gazeuse autour de l'étoile.

2. a. On a $f = c/\lambda$.

b. • Si l'étoile s'approche de la Terre, on a :

$$f_r/f_e = c/(c - u),$$

donc $(c/\lambda_r)/(c/\lambda_e) = c/(c - u)$ et $\lambda_r/\lambda_e = (c - u)/c$.

• Si l'étoile s'éloigne de la Terre, on a $\lambda_r/\lambda_e = (c + u)/c$.

c. • Si l'étoile s'approche de la Terre, $\lambda_r < \lambda_e$, la raie se décale vers les courtes longueurs d'onde, donc vers le bleu (cas **b**).

• Si l'étoile s'éloigne de la Terre, $\lambda_r > \lambda_e$, la raie se décale vers les grandes longueurs d'onde, donc vers le rouge (cas **c**).

3. Pour un rapprochement, on a $\lambda_r/\lambda_e = (c + u)/c$, donc :

$$\lambda_r \cdot c/\lambda_e - c = u \text{ et } u = c \cdot (\lambda_r - \lambda_e)/\lambda_e.$$

Pour un éloignement, on a $\lambda_r/\lambda_e = (c - u)/c$, donc :

$$-\lambda_r \cdot c/\lambda_e + c = u \text{ et } u = c \cdot (\lambda_e - \lambda_r)/\lambda_e.$$

Donc on peut dire pour résumer les deux formules :

$$u = |\Delta\lambda| \cdot c/\lambda_e \text{ pour } u > 0.$$

4. a. Étoile 1 : décalage vers le rouge : s'éloigne.

Étoile 2 : décalage vers le rouge : s'éloigne.

Étoile 3 : décalage vers le bleu : se rapproche.

b. Étoile 1 : $\Delta\lambda = 80,0$ nm.

Étoile 2 : $\Delta\lambda = 119$ nm.

Étoile 3 : $\Delta\lambda = -81,0$ nm.

c. Étoile 1 : $u = 4,52 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Étoile 2 : $u = 6,72 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Étoile 3 : $u = 4,58 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

5. a. Voir tableau à la fin de la séquence, p. 32.

b. $v = f(t)$ est une fonction sinusoïdale, qui reflète bien le mouvement périodique de l'étoile.

c. En modélisant la courbe par une fonction sinusoïdale, on retrouve la période du mouvement.

Pour 51 Pégasi B : $T = 4,2$ j.

Remarque : pour 51 Pégasi B, la valeur de la période T du mouvement de Pégasi permet d'évaluer en première approximation que la masse de la planète est $M = 9,1 \times 10^{26}$ kg. 51 Pégasi B est une géante gazeuse comme Jupiter.

6. a. Le « redshift » signifie le décalage vers le rouge (en anglais : il s'agit donc du décalage vers le rouge (autrement dit vers les grandes longueurs d'onde) des raies d'absorption).

Le décalage vers le rouge se produit lorsque les galaxies (et donc leurs étoiles) s'éloignent les unes des autres et donc s'éloignent de la Voie lactée, ce qui est un argument en faveur de l'expansion de l'Univers.

b. En comparant les vitesses radiales des étoiles de la question 4.c., on peut dire que pour les étoiles qui présentent un décalage vers le rouge, la galaxie dans laquelle se trouve l'étoile 2 est plus distante de la Voie lactée que la galaxie dans laquelle se trouve l'étoile 1.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : Étudier le phénomène de diffraction

1. b et c.

2. a et b.

3. a et c.

2 1. Voir figure 3 du cours.

2. $\theta = \lambda/a$ avec θ l'écart angulaire en radian ; λ la longueur d'onde de l'onde incidente en m et a la dimension de l'obstacle en m.

3. On a $\tan \theta = (d/2)/D = d/2D \approx \theta = \lambda/a$, donc :

$$d/2D \approx \lambda/a.$$

3 1. Non. Si c'était le cas, on observerait l'ombre du cheveu ou le faisceau laser limité par la fente.

2. La dimension de ces objets est voisine ou inférieure à la longueur d'onde du laser

3. λ et D étant fixés, la largeur de la tache centrale de diffraction d est inversement proportionnelle à la dimension de l'obstacle a ($d = 2D \cdot \lambda/a$). Comme $d_{\text{fente}} < d_{\text{fil}}$, on en déduit que $a_{\text{fente}} > a_{\text{fil}}$.

4 1. a. Voir figure a de l'exercice 3.

b. Même figure, mais plus étalée puisque le demi-angle, donc la largeur de la tache centrale, est inversement proportionnel à a .

2. a. On observe une figure de diffraction verticale.

b. Même figure, mais moins étalée puisque le demi-angle, donc la largeur de la tache centrale, est proportionnel à la longueur d'onde. Or $\lambda_{\text{rouge}} > \lambda_{\text{vert}}$

5 2. On obtient une droite qui passe par l'origine.

En effet, on sait que $\theta = \lambda/a$ donc pour λ fixée, θ est bien proportionnel à $(1/a)$.

3. Pour une ordonnée de $\theta_f = 2,5 \times 10^{-3}$ rad, on lit sur la droite une abscisse $1/a_f = 3,8 \times 10^3 \text{ m}^{-1}$.

Donc $a_f = 2,6 \times 10^{-4} \text{ m} = 0,26 \text{ mm}$.

4. $e = 0,26 - 0,25/0,25 = 4\%$, l'écart relatif est faible : la mesure est en accord avec la valeur annoncée par le constructeur.

6 1. On a $\lambda = v/f$. Ici, $\lambda = 340/500 = 0,680 \text{ m}$.

2. a est du même ordre de grandeur que λ , l'onde sonore est diffractée par la porte.

3. On a $\theta = \lambda/a$, d'où $\theta = 0,680/0,80 = 0,85 \text{ rad}$.

4. L'angle formé entre Aurélien et le centre de la porte est tel que $\tan \theta_A = 0,90/1,1$ donc $\theta_A = 0,68 \text{ rad}$.

$\theta_A < \theta$, Aurélien est situé avant la première zone d'extinction, il entend donc le son.

5. Les longueurs d'onde de la lumière sont comprises entre 400 et 800 nm, ce qui est très faible devant la

dimension de la porte. La porte ne diffracte pas la lumière, la lumière se propage donc rectilignement et Aurélien est dans l'ombre de la porte.

COMPÉTENCE 2 : Étudier le phénomène d'interférences

7 1. Faux. Il faut des conditions d'interférences.

2. Vrai.

3. Faux. Deux ondes en phase se renforcent.

8 1. Situation a : interférences destructives, zone sombre.

Situation b : interférences constructives, zone éclairée, ondes en phase.

Situation c : zone peu éclairée.

2. La situation a (les deux ondes s'annulent).

3. Situation a : silence ; situation b : son plus fort ; situation c : son moins fort que dans la situation b.

9 1. a. Le phénomène d'interférences est la variation d'amplitude de l'onde résultant de la superposition de deux ondes dans des conditions particulières.

b. Il faut faire la moyenne sur le maximum d'interfranges représentées.

Pour la figure a : $i_a = 0,23 \text{ cm}$.

Pour la figure c : $i_b = 0,28 \text{ cm}$.

Pour la figure b : $i_c = 0,20 \text{ cm}$.

2. On a $i_c < i_a < i_b$ et $\lambda_{\text{bleu}} < \lambda_{\text{vert}} < \lambda_{\text{rouge}}$.

Or i est proportionnel à λ , donc :

figure c : laser bleu ;

figure a : laser vert ;

figure b : laser rouge.

3. On trace $i = f(\lambda)$ à partir des mesures précédentes, puis on réalise l'expérience d'interférences avec la lumière laser de longueur d'onde inconnue. On reporte ensuite la mesure de l'interfrange sur la droite et on détermine en abscisse la longueur d'onde recherchée.

10 1. Deux ondes sonores monochromatiques issues d'une même source se superposent après avoir parcouru deux trajectoires différentes : on est bien dans les conditions d'interférences.

2. a. • Il y a interférences constructives lorsque les ondes sont en phase : les minima et maxima des deux ondes coïncident, ce qui est obtenu si les deux ondes sont décalées d'un nombre entier de longueurs d'onde.

• Il y a interférences destructives lorsque les ondes sont en opposition de phase : les minima d'une onde coïncide avec les maxima d'une autre, ce qui est obtenu si les deux ondes sont décalées d'une demi-longueur d'onde.

b. Lorsque le dispositif est réglé en mode « anti-bruit », les interférences sont destructives, donc aucun signal n'apparaît sur l'oscilloscope.

c. On va observer un signal sur l'oscilloscope. En effet, la fréquence et donc la longueur d'onde des ondes est modifiée et la distance parcourue par les deux ondes ne respecte plus les conditions d'interférences destructives.

COMPÉTENCE 3 : Utiliser l'effet Doppler

12 1. a et c.

2. b.

3. a et c.

13 1. Sylvain est l'émetteur, Morgane et Nadia, les récepteurs.

2. Sylvain s'éloigne de Morgane, la longueur d'onde (distance entre deux fronts d'onde consécutifs) est plus grande et la fréquence perçue par Morgane est plus petite ($f = v/\lambda$).

Sylvain s'approche de Nadia, la longueur d'onde (distance entre deux fronts d'onde consécutifs) est plus petite et la fréquence perçue par Nadia est plus grande ($f = v/\lambda$).

14 1. a. f_r est la fréquence perçue par le récepteur, f_e est la fréquence de l'émetteur, v est la célérité de l'onde, u , la vitesse de l'émetteur par rapport au récepteur.

b. Il s'agit des situations où l'émetteur se rapproche du récepteur (–) et où l'émetteur s'éloigne du récepteur (+).

2. a. La fréquence du son perçu par Elsa est supérieure à celle de l'émetteur. La formule est donc :

$$f_r = f_e \cdot (v/v - u).$$

b. On a $u = v \cdot (f_r - f_e)/f_r$.

Donc $u = 340 \times (417 - 400)/417$

$$u = 13,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 49,9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}.$$

15 1. L'étoile A s'éloigne de la Terre, car les raies d'absorption sont décalées vers les grandes longueurs d'onde.

L'étoile B se rapproche de la Terre, car les raies d'absorption sont décalées vers les courtes longueurs d'onde.

2. Le décalage des raies est d'autant plus important que la vitesse de l'étoile dans la direction d'observation est élevée, donc l'étoile A a une vitesse plus élevée que l'étoile B.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

17 1. Young : interférences.

Arago : interférences.

Fresnel : diffraction.

Fizeau : effet Doppler.

2. Interférences constructives : « la lumière est la plus intense lorsque la différence de route est un multiple d'une certaine longueur ».

Interférences destructives : « et elle est moins intense dans l'état intermédiaire des parties qui interfèrent »
« Qui se fût imaginé qu'on en viendrait à supposer que l'obscurité pourrait être engendrée en ajoutant de la lumière à la lumière ? »

3. Fresnel remet en cause la propagation rectiligne de la lumière dans son expérience.

4. La « certaine longueur » est la longueur d'onde de la lumière incidente.

5. On peut citer comme application de la citation de Fizeau la détermination de la vitesse des étoiles par rapport à la Terre ou la détection des exoplanètes.

18 Sheldon Doppler

Dans la série américaine « The Big Bang Theory », le professeur Sheldon Cooper se déguise en effet Doppler.

1. Donner la définition de cet effet.

L'effet Doppler est la variation de fréquence d'une onde mesurée entre l'émission et la réception, lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps.

2. Expliquer pourquoi ce déguisement montre que la fréquence apparente d'une onde augmente quand on se rapproche de la source.

Sur le déguisement, la source est située au centre, modélisée par un point blanc. On constate que plus on se rapproche de la source et plus les traits blancs, modélisant le front d'onde, se rapprochent. La longueur d'onde apparente diminue et par conséquent, la fréquence apparente augmente ($f = v/\lambda$). C'est la situation inverse lorsqu'on s'éloigne de la source.

19 1. a. L'effet Doppler.

b. Voir cours.

2. La fréquence de l'émetteur est de 1 Hz (une feuille par seconde). Lorsque l'observateur se rapproche, il voit une feuille toutes les demi-secondes : la fréquence apparente est donc de 2 Hz, d'où un décalage de fréquence de 1 Hz.

3. a. L'observateur va voir défiler les feuilles moins fréquemment : la fréquence apparente va diminuer.

b. L'observateur verra les feuilles fixes s'il s'éloigne à la même vitesse que celle-ci, soit $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

4. Bien que les feuilles continuent à défiler à raison d'une feuille par seconde, un observateur en mouvement les voit défiler à une fréquence différente. On parle donc de fréquence apparente.

20 1. Voir cours en remplaçant la fente par une lamelle de microscope sur laquelle est saupoudrée la poudre.

2. En utilisant l'échelle, $d = 13 \text{ cm}$.

3. On a $\tan \theta \approx \theta = d/2D = 1,22 \lambda/a$.

4. $a = 1,22 \cdot 2D \cdot \lambda/d$, donc :
 $a = 1,22 \times 2 \times 1,0 \times 633 \times 10^{-9} / (13 \times 10^{-2}) = 12 \times 10^{-6}$
 $= 15 \mu\text{m}$.

21 1. a. La dimension de l'obstacle doit être du même ordre de grandeur ou inférieure à la longueur d'onde de l'onde incidente.

b. On mesure $a = 10 \text{ cm}$ et $\lambda = 5 \text{ cm}$. Ces deux grandeurs sont du même ordre de grandeur.

c. Oui, on mesure la même longueur d'onde $\lambda = 5 \text{ cm}$ avant et après l'obstacle.

2. a. et b. L'écart angulaire est le demi-angle séparant les deux premiers minima d'amplitude.

c. $\theta = \lambda/a$. Ici, $\theta = 50/100 = 0,50 \text{ rad} = 28^\circ$. On mesure sur la figure un angle de 29° . La relation est donc vérifiée.

3. a. Il s'agit du phénomène d'interférences.

b. Le point A correspond à un maximum d'amplitude : c'est une zone d'interférences constructives.

22 La longueur d'onde de la houle est $\lambda = 230 \text{ m}$, l'ouverture du port est de dimension $a = 200 \text{ m}$. On a $a < \lambda$, donc la houle est diffractée par l'ouverture du port. La houle change donc de direction de propagation et se propage dans une large partie du milieu au-delà de l'ouverture du port.

De plus, on a $\theta = \lambda/a$.

Ici, $\theta = 230/200 = 1,15 \text{ rad} = 1,15 \times 180/\pi = 65,9^\circ$.

Sur le schéma, le bateau est situé à un angle de 26° . Le bateau se situe avant le premier minimum d'amplitude, il ressentira donc les effets de la houle.

23 1. a. Il s'agit de l'effet Doppler.

b. On a $f = v/\lambda$ donc si $f_r/f_e = v/(v+u)$, alors :

$$(v/\lambda_r)/(v/\lambda_e) = v/(v+u) \text{ et } \lambda_e/\lambda_r = v/(v+u).$$

2. a. On a pour l'onde sonore :

$$f_r = f_e(v/(v+u)) = 500 \times (340/(340 + 0,750)) = 499 \text{ Hz}.$$

Pour la lumière :

$$\begin{aligned} \lambda_r &= \lambda_e \cdot ((v+u)/v) \\ &= 550 \times 10^{-9} \times (3,00 \times 10^8 + 0,750/(3,00 \times 10^8)) \\ &= 550 \text{ nm}. \end{aligned}$$

b. Non, ces variations sont trop faibles pour être perçues par l'élève.

3. On a $\Delta\lambda/\lambda_e = u/c = 0,051$, donc :

$$u = 0,051c = 0,051 \times 3,00 \times 10^8 = 1,5 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

24 1. Montage :

– régler le GBF en mode sinusoïdal sur 700 Hz et brancher un haut-parleur ;

– placer un obstacle devant le haut-parleur et un microphone mobile qui balaie dans un plan perpendiculaire à la direction de l'obstacle, relié à un oscilloscope ou un logiciel d'acquisition.

Il y a diffraction d'une onde pour une dimension de l'obstacle proche ou inférieure à la longueur d'onde de l'onde. Ici $\lambda = v/f = 340/700 = 0,486 \text{ m}$. On peut choisir comme obstacle une fente de 40 cm de largeur.

François doit constater sur l'oscilloscope, en balayant le plan perpendiculaire à la direction de l'obstacle, un maximum d'amplitude dans la direction haut-parleur-obstacle et des minima d'amplitude situés de part et d'autre.

2. Montage :

– régler le GBF en mode sinusoïdal sur 700 Hz et brancher deux haut-parleurs côte à côte ;

– placer un microphone mobile qui balaie la zone de recouvrement des deux ondes, relié à un oscilloscope ou un logiciel d'acquisition.

Il faut que les deux haut-parleurs émettent des sons à la même fréquence et qu'ils soient synchronisés.

François doit constater à l'oscilloscope, en déplaçant le microphone dans la zone de recouvrement des deux ondes sonores, des maxima et des minima d'amplitude.

3. François aurait pu démontrer expérimentalement l'effet Doppler sonore (voir **activité 5**).

25 1. L'effet Doppler est la variation de fréquence d'une onde mesurée entre l'émission et la réception, lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps.

2. L'émetteur est ici l'étoile, le récepteur, l'observateur sur Terre.

3. a. Les raies d'absorption proviennent des éléments chimiques présents dans la couche gazeuse autour d'une étoile.

b. On évalue le décalage par rapport au spectre du Soleil, considéré comme fixe.

4. a. On a $u = c \cdot \Delta\lambda/\lambda_0$. Ici, c est la célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

$$\text{À } t_1 : u = 2,3 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$\text{À } t_2 : u = 6,9 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

b. Un décalage vers le rouge correspond à un décalage vers les grandes longueurs d'onde.

À l'instant t_1 , $\Delta\lambda > 0$, donc la longueur d'onde augmente entre l'émission et la réception : l'étoile s'éloigne de la Terre.

À l'instant t_2 , $\Delta\lambda < 0$, donc la longueur d'onde diminue entre l'émission et la réception : l'étoile se rapproche de la Terre.

26 1. Il s'agit de l'absorption de la lumière.

2. Les interférences constructives sont obtenues lorsque deux ondes monochromatiques de même longueur d'onde et en phase se superposent. En pratique, il faut que les deux ondes soient issues de la même source et aient parcouru des trajectoires différentes.

3. Il s'agit des rayons ② et ③ : le rayon réfléchi à l'interface air-lame et celui réfracté, réfléchi puis réfracté aux interfaces air-lame puis lame-air. Ces rayons (ondes) proviennent de la même source (modélisée par le rayon ①) mais ont parcouru des trajectoires différentes.

4. Dans une direction donnée, les interférences sont constructives pour une longueur d'onde donnée λ . Si on change de direction, on change de longueur d'onde pour laquelle les interférences sont constructives, donc de couleur. La couleur dépend donc de la direction d'observation.

5. La bulle de savon est une fine couche de savon entourée d'air, ce qui peut être modélisé par la lame mince. On observe de nombreuses couleurs différentes sur la bulle de savon car on observe toutes les zones de la bulle avec des angles différents.

EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

27 1. Lorsque la lumière arrive à l'interface entre deux milieux homogènes et transparents, une partie est réfléchi et l'autre réfractée (transmise).

2. a. Le premier rayon est réfléchi par la lentille. Le deuxième est réfracté par la lentille, puis réfléchi par la plaque de verre et enfin réfracté par la lentille.

b. Ces deux rayons sont issus de la même source de lumière et ont parcouru des trajectoires différentes, ils vont donc interférer.

c. On aura des interférences constructives lorsque les ondes sont en phase, des interférences destructives lorsque les ondes sont en opposition de phase.

3. a. Dans la formule, plus λ augmente, plus le rayon du premier anneau noir augmente. Or $\lambda_{\text{rouge}} > \lambda_{\text{bleu}}$ donc $r(\text{rouge}) > r(\text{bleu})$. La figure a correspond donc à la figure d'interférences en lumière rouge, la figure b, à la figure d'interférences en lumière bleu.

b. La figure d'interférences dépend de la longueur d'onde. En lumière polychromatique, les figures d'interférences correspondant à chaque longueur d'onde vont se superposer, ce qui va conduire à l'apparition d'anneaux colorés.

Tableau de l'activité 6

t (s)	0	3 600	5 400	7 200	10 800	14 400	18 000	21 600	25 200
$\Delta\lambda$ (nm)	$1,17 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-5}$	$-7,20 \times 10^{-5}$	$-1,16 \times 10^{-4}$	$-3,00 \times 10^{-5}$	$1,11 \times 10^{-4}$	$4,90 \times 10^{-5}$	$-1,03 \times 10^{-4}$	$-6,60 \times 10^{-5}$
v (m · s ⁻¹)	60,0	5,09	-36,7	-59,1	-15,3	56,5	25,0	-52,5	-33,6

Spectres UV-visible et infrarouge

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
<p>Spectres UV-visible</p> <ul style="list-style-type: none"> – Lien entre couleur perçue et longueur d'onde au maximum d'absorption de substances organiques ou inorganiques. <p>Spectres IR</p> <ul style="list-style-type: none"> – Identification de liaisons à l'aide du nombre d'onde correspondant ; détermination de groupes caractéristiques. – Mise en évidence de la liaison hydrogène. 	<ul style="list-style-type: none"> – <i>Mettre en œuvre un protocole expérimental pour caractériser une espèce colorée.</i> – Exploiter des spectres UV-visible. – Exploiter un spectre IR pour déterminer des groupes caractéristiques à l'aide de tables de données ou de logiciels. – Associer un groupe caractéristique à une fonction dans le cas des alcools, aldéhyde, cétone, acide carboxylique, ester, amine, amide. – Connaître les règles de nomenclature de ces composés ainsi que celles des alcanes et des alcènes.

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Connaître les groupes caractéristiques et les règles de nomenclature.
2. Exploiter des spectres UV-visible.
3. Exploiter des spectres infrarouge.

Évaluation diagnostique p. 86

SITUATION 1

Cette situation permet de revenir sur la notion de groupes d'atomes caractéristiques déjà rencontrée en Seconde. Les propriétés spécifiques de ces groupes permettent de les relier aux familles chimiques. Ces notions seront abordées dans l'**activité 1** qui présente les différentes familles et leur nomenclature.

SITUATION 2

Cette situation doit permettre aux élèves d'appréhender par quel moyen on peut caractériser une couleur appartenant à un domaine de longueur d'onde plus ou moins étendu. Le rouge, par exemple, correspond à des longueurs d'onde comprise entre 630 et 780 nm. Un spectromètre UV/Visible est capable de différencier un rouge d'un autre d'après les longueurs d'onde. Un colorant rouge qui absorbe à 490 nm peut être différencié d'un autre colorant rouge qui absorbe à 510 nm, alors que cette distinction ne peut être faite par l'œil humain.

L'**activité 2** revient sur le principe de fonctionnement d'un spectrophotomètre. Pour des raisons de clarté, l'appareil choisi est à double faisceau bien que les appareils des lycées soient souvent à simple faisceau. L'**activité 4** donne l'occasion de mettre en œuvre cet appareil.

SITUATION 3

Cette situation présente une application de la spectroscopie d'absorption IR. Les élèves connaissent cette technique d'identification de molécules à travers les séries télévisées qui mettent en scène des policiers scientifiques. Après analyses de l'échantillon prélevé, les résultats sont comparés avec ceux obtenus pour des véhicules automobiles présents dans la base de données sur les peintures automobiles.

L'**activité 3** montre comment, dans un tout autre domaine, celui de l'art, on peut aussi l'utiliser.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

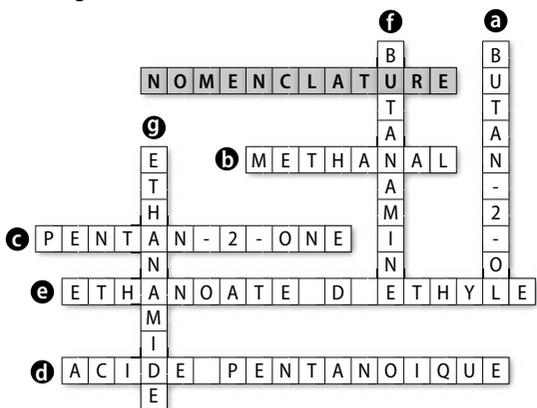
Nommer les composés organiques p. 88

1. La nomenclature est un ensemble de règles qui permet d'attribuer un nom à un composé organique.
2. Un des hydrogènes du squelette carboné est simplement remplacé par un groupe d'atomes caractéristique, d'où le principe de substitution.

3. a. Butan-2-ol.
- b. Méthanal.
- c. Pentan-2-one.
- d. Acide pentanoïque.
- e. Éthanoate d'éthyle.
- f. Butanamine.
- g. Éthanamide.

4. Cela permet d'identifier la famille chimique à laquelle appartient une molécule et d'écrire sa formule développée ou de nommer une molécule à partir de sa formule développée.

5. a. L'acide formique (au lieu d'acide méthanoïque).
- b. Ce nom d'usage est très répandu et fait référence à son origine (les fourmis).



ACTIVITÉ 2

Principe d'un spectrophotomètre

p. 89

1. Le domaine de longueur d'onde s'étend de 180 à 780 nm pour l'UV proche-visible.
2. $1,10 \times 10^{-18} \text{ J} \leq E = h \cdot c / \lambda \leq 2,55 \times 10^{-19} \text{ J}$, soit $6,9 \text{ eV} \leq E \leq 1,6 \text{ eV}$.
3. L'énergie du rayonnement absorbé doit correspondre à celle d'une transition électronique de la molécule, soit : $\Delta = h \cdot c / \lambda = 2,8 \text{ eV}$.
4. a. D'après le texte, les électrons concernés sont des électrons de valence.
b. Pour des énergies importantes, les longueurs d'onde λ sont petites donc les radiations situées dans l'UV.
5. a. Les solutions sont disposées dans des cuves en quartz car ces cuves n'absorbent pas sur l'ensemble du domaine UV-visible.
b. Les cuves en verre peuvent être utilisées seulement dans le domaine du visible car elles absorbent dans l'UV.
c. Il faut aussi choisir un solvant tel que l'eau ou l'hexane, transparents dans le domaine de longueur d'onde choisi.
6. Cela permet de soustraire la part de l'absorption liée au solvant afin de n'avoir que celle due à la molécule étudiée.

7. Voir la fiche pratique 8, page 585.

8. Le spectre donne la longueur d'onde correspondant au maximum d'absorption : elle caractérise une molécule donnée.

ACTIVITÉ 3

Comment identifier un faux tableau ?

p. 90

1. Un composé organique contient essentiellement des atomes de carbone et d'hydrogène, un composé inorganique est en général dépourvu de carbone (il y a quelques exceptions).

2. Le bleu de Prusse fut découvert en 1704 à Berlin. La Prusse est l'ancien nom de l'Allemagne. On appelle aussi ce pigment bleu de Berlin.

3. a. La triple liaison $\text{C}\equiv\text{N}$ donne une bande caractéristique.

b. On trouve $\tilde{\nu} = 2\,100 \text{ cm}^{-1}$ pour la triple liaison $\text{C}\equiv\text{N}$.

4. L'absorption dans l'infrarouge de la triple liaison carbone-azote du pigment à $2\,100 \text{ cm}^{-1}$ est facilement détectée par un spectromètre en raison de l'absence d'autres absorptions dans cette région du spectre. Le manteau a été peint en utilisant le bleu de Prusse, un pigment qui n'a été découvert qu'au XVIII^e siècle. L'auteur n'a donc pas vécu à la Renaissance.

ACTIVITÉ 4

Caractériser des espèces colorées

p. 91

1. La masse des différents solides est $m = c \cdot V \cdot M$.
2. Voir fiche pratique 14, page 591.
3. a. La source est par exemple une lampe tungstène/halogène.
b. Le domaine spectral de la lampe utilisée est 330-830 nm.
4. a. C'est donc à ces longueurs d'ondes que la lampe émet des photons qui pourront être absorbés. Ce domaine correspondant à l'UV proche et le visible.
b. Oui, ce sont des solutions colorées.
5. a. et b. Pour la cuve en polystyrène, il n'y a aucune absorption dans le domaine du visible. La cuve pourra être utilisée avec des solutions colorées.
6. a. On n'observe aucune absorption significative sur le domaine visible.
b. L'eau est un très bon solvant.
7. Solution aqueuse de sulfate de cuivre (II) : $\lambda_{\text{max}} = 760 \text{ nm}$;
solution aqueuse de sulfate de fer (II) : $\lambda_{\text{max}} = 400 \text{ nm}$;
solution aqueuse de sulfate de fer (III) : $\lambda_{\text{max}} = 440 \text{ nm}$;
solution aqueuse de sulfate de cobalt (II) : $\lambda_{\text{max}} = 510 \text{ nm}$.
Si le mélange inconnu est par exemple un mélange équimolaire de solution de sulfate de cuivre (II) et de sulfate de cobalt (II), il a un maximum d'absorption à

510 nm, comme la solution de CoSO_4 , et un autre maximum à 760 nm, comme celle de CuSO_4 .

8. Ce spectre représente la somme des spectres d'absorption de deux des espèces étudiées.

9. Le mélange contient donc du CoSO_4 et du CuSO_4 .

EXERCICES

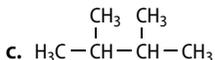
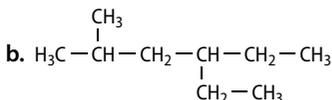
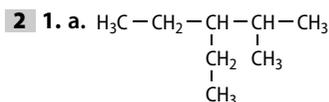
COMPÉTENCE 1 : Connaître les groupes caractéristiques et les règles de nomenclature

1. **1. Faux.** C'est un alcane.

2. **Faux.** Elle est cyclique.

3. **Vrai.**

4. **Vrai.**



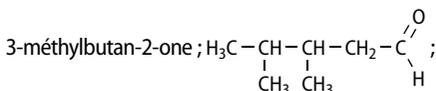
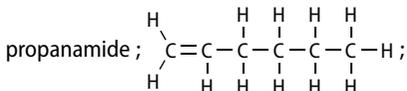
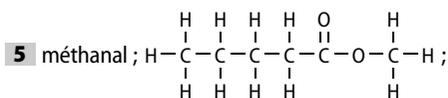
2. Ce sont tous des alcanes.

3. **a.** 4-méthylpentan-2-ol.

b. 3-méthylbut-1-ène.

c. 2,4,5-triméthylheptane.

4. Groupes carboxyle **a**, ester **b**, amide **c** et amine **d**.
 Acide éthanoïque **a**, éthanoate d'éthyle **b**, butanamide **c** et éthanamine **d**.



acide butanoïque.

6 Noms officiels IUPAC et famille chimique

1. Quel est le nom en nomenclature IUPAC du composé **a** suivant ?

Il s'agit du 3,4-diméthylhexane.

2. À quelle famille de composés organiques appartient la molécule **b** ci-après ?

Elle appartient aux amides.

7. **1.** Le groupe **1** caractérise les acides carboxyliques et le groupe **2** les esters.

2. Le groupe hydroxyle caractérise les alcools.

COMPÉTENCE 2 : Exploiter des spectres UV-visible

8. **1. b.**

2. **c.**

3. **b.**

9. **1.** L'intensité du faisceau sortant est moins grande.

2. Une partie de l'énergie incidente a été absorbée.

3. L'absorbance A reflète le rapport de l'intensité de la radiation incidente sur l'intensité de la radiation transmise.

4. S'agissant d'un rapport de deux grandeurs de même unité, il n'y a pas d'unité.

11. **1.** La longueur d'onde (en nm) figure en abscisse et l'absorbance (sans unité) en ordonnée.

2. Le maximum d'absorption se situe vers 620 nm.

3. Cela se trouve dans le domaine visible.

4. La solution, qui absorbe dans le rouge, apparaît cyan.

12. **1. et 2.** La solution de chlorophylle absorbe principalement dans le bleu (430 nm) et le rouge (660 nm). La solution est donc de couleur jaune + cyan = vert.

COMPÉTENCE 3 : Exploiter des spectres infrarouge

13. **1. b.**

2. **b et c.**

3. **a.**

14. **1.** De 2,5 à 25 μm .

2. Au-dessus de 1 200 cm^{-1} .

3. **a.** La « zone des empreintes digitales » se trouve au-dessous de 1 200 cm^{-1} .

b. Elle permet d'identifier une molécule en comparant son spectre IR à ceux enregistrés dans une banque de données.

15. **1.** Les alcènes.

2. $\lambda = 10\,000 / 1\,650 = 6,1 \mu\text{m}$.

17. **1.** Molécule **a** : vers 2 200 cm^{-1} pour la liaison $\text{C}\equiv\text{N}$; molécule **b** : vers 3 300 cm^{-1} pour la liaison $\text{O}-\text{H}$.

2. Molécule **a** : spectre 1 ; molécule **b** : spectre 2.

18. **1.** Le spectre **1** présente une large bande dans sa partie gauche (vers 3 350 cm^{-1}) qui disparaît au profit d'une fine bande vers 3 600 cm^{-1} sur le spectre **2**.

2. Cette large bande correspond à la vibration des liaisons OH associées par liaisons hydrogène. Ces liaisons hydrogène disparaissent par dilution.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

19 1. $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{OH}$.

2. L'éthanol.

20 1. Le principe actif d'un médicament est la molécule qui présente un intérêt thérapeutique avéré.

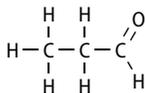
2. Il faut se placer au maximum d'absorption, donc à la longueur d'onde $\lambda = 530 \text{ nm}$.

3. L'absorbance étant plus forte (2,5 supérieur à 0,14), la concentration de la solution de permanganate est plus importante que celle de l'eau de Dakin.

4. L'eau de Dakin, qui absorbe autour de 530 nm, c'est-à-dire dans le vert, est violette.

21 1. C'est un aldéhyde car on a les bandes d'absorption caractéristiques des liaisons $\text{C}=\text{O}$ à 1730 cm^{-1} et $\text{C}-\text{H}$ à 2726 cm^{-1} .

2. Avec 3 atomes de carbone et le groupe carbonyle en bout de chaîne, il vient :

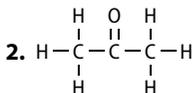


3. Il s'agit du propanal.

22 1. L'absorption d'énergie dans l'UV-visible correspond à une transition électronique.

2. Le pigment absorbe entre 440 et 480 nm, c'est-à-dire dans le bleu : il apparaît jaune.

23 1. Les cétones possèdent le groupe caractéristique carbonyle.



3. La molécule de 4-méthylpent-3-èn-2-one, qui contient le groupe d'atomes caractéristique des cétones ($\text{C}=\text{O}$), présente la bande de la liaison $\text{C}=\text{O}$ vers 1700 cm^{-1} , mais aussi une bande vers 1650 cm^{-1} : celle de la double liaison $\text{C}=\text{C}$.

4. Les deux spectres présentent la bande de la liaison $\text{C}=\text{O}$ vers 1700 cm^{-1} , mais le second possède aussi une bande vers 1650 cm^{-1} : il s'agit du spectre de la 4-méthylpent-3-èn-2-one.

5. $\tilde{\nu} = 1/\lambda$ soit $\lambda = 1/1700 = 5,9 \times 10^3 \text{ nm}$.

24 1. Les groupes hydroxyle et ester.

2. La longueur d'onde optimale est celle qui correspond à l'absorbance maximale, soit $\lambda = 306 \text{ nm}$.

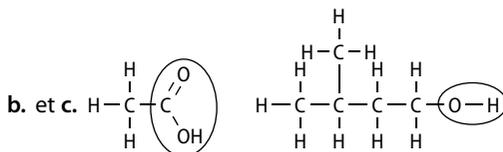
3. a. $\lambda < 400 \text{ nm}$: cette longueur d'onde appartient au domaine des ultraviolets.

b. L'absorbance est proportionnelle à la quantité de matière de salicylate de méthyle présent. Celui-ci subit une dégradation photochimique : sa quantité de matière diminue au cours de l'irradiation. Ainsi, l'absorbance est plus faible après irradiation.

25 1. Cette molécule possède le groupe $\begin{array}{c} \text{O} \\ || \\ -\text{C}-\text{O}- \end{array}$ caractéristique de la famille des esters.

2. On trouve sur le spectre les bandes d'absorption caractéristiques des liaisons $\text{C}=\text{O}$ à 1750 cm^{-1} et $\text{C}-\text{O}$ à 1200 cm^{-1} .

3. a. Acide éthanoinique et 3-méthylbutan-1-ol.



d. Ils appartiennent à la famille des acides carboxyliques et à celle des alcools.

26 1. On appelle $1/\lambda$ le nombre d'onde.

2. La figure 1 donne l'absorbance en ordonnée, alors que la figure 2 donne la transmittance.

3. La technique utilisée est la spectroscopie IR car les longueurs d'onde utilisées sont de l'ordre de :
 $\lambda = 10\,000/3\,000 = 3 \mu\text{m}$.

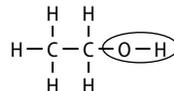
4. a. Le maximum d'absorption de CO_2 se situe vers 2350 cm^{-1} .

b. Cela correspond sur la courbe à une absorbance de 0,055.

5. a. D'après le tableau, la concentration massique en CO_2 dans l'échantillon est de $590 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

b. Ce vin est donc conforme à la législation, qui autorise des teneurs en CO_2 de 200 à $700 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

6. et 7. L'éthanol a pour formule développée :



Il comporte un groupe d'atomes caractéristique hydroxyle.

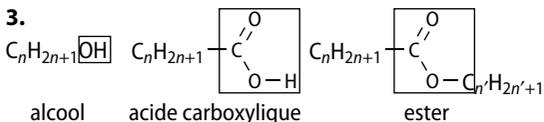
8. Le spectre de gauche sur la figure 2 présente une bande étroite à 3670 cm^{-1} , correspondant au groupe hydroxyle « libre », donc non associé dans l'éthanol en phase vapeur. Le spectre de droite présente une bande large à 3324 cm^{-1} , correspondant au groupe hydroxyle associé par liaison hydrogène dans l'éthanol en solution.

27 1. Les deux spectres présentent de grandes similitudes (pics identiques à $2950-2850$, 1737 , 725 cm^{-1}) et quelques différences.

2. a. $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$

b. Le propane.

3.



4. a. $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$ et $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{COOH}$

b. Propan-1-ol et acide propanoïque.

5. Dans le spectre du liant, on retrouve les pics identiques à ceux de la cire d'abeille, mais en plus le pic à 3450 cm^{-1} , caractéristique des groupes OH des fonctions acide carboxylique et alcool, issues de l'hydrolyse de l'ester.

EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

28 1. Un chromophore est un groupe d'atomes responsable d'une absorption caractéristique.

2. Les deux molécules contiennent le chromophore



3. Le spectre **b** est celui de la molécule de naphtacène, car par rapport au spectre de l'anthracène, on peut observer une augmentation de λ_{max} (le spectre se déplace vers le rouge, effet bathochrome) et une augmentation de l'intensité des bandes (effet hyperchrome). En effet, si plusieurs chromophores sont juxtaposés dans une même molécule, l'ensemble forme un système conjugué de chromophores. Plus le nombre d'atomes sur lequel le système conjugué s'étend est grand, plus le spectre d'absorption est déplacé « vers le rouge » (effet bathochrome).

Spectres RMN du proton

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
– Identification de molécules organiques à l'aide : <ul style="list-style-type: none"> • du déplacement chimique ; • de l'intégration ; • de la multiplicité du signal : règle des $(n+1)$-uplets. 	– Relier un spectre RMN simple à une molécule organique donnée, à l'aide de tables de données ou de logiciels. – Identifier les protons équivalents. Relier la multiplicité du signal au nombre de voisins. – Extraire et exploiter des informations sur différents types de spectres et sur leurs utilisations.

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Savoir ce qu'est le déplacement chimique en RMN.
2. Identifier les protons équivalents et relier la multiplicité du signal au nombre de voisins.
3. Utiliser l'intégration d'un signal et relier un spectre RMN simple à une molécule organique donnée.

Évaluation diagnostique

p. 104

SITUATION 1

Cette situation permet de revenir sur la notion de spectre discontinu et de quantification de l'énergie.

Le spectre d'émission de l'hydrogène est discontinu car les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène sont quantifiés. Ainsi, en passant d'un niveau d'énergie à un niveau d'énergie inférieur, un atome d'hydrogène émet un rayonnement de fréquence bien définie.

L'**activité 2** développe l'idée des niveaux d'énergie du noyau d'hydrogène soumis à un champ magnétique, dans le cadre de la RMN du proton.

SITUATION 2

Cette situation sert à rappeler qu'un champ magnétique modifie les propriétés de l'espace, qui peuvent être mises en évidence par une aiguille aimantée, et à faire émerger l'idée que certains noyaux atomiques sont sensibles aux champs magnétiques.

En présence d'un champ magnétique, un noyau d'hydrogène (proton) voit ses propriétés se modifier. De même qu'une aiguille aimantée présente deux positions d'équilibre dans un champ magnétique : dans le même sens (équilibre stable) et en sens opposé à celui-

ci (équilibre instable), le noyau d'hydrogène est sensible à la présence d'un champ magnétique et peut prendre deux « orientations » opposées.

L'**activité 2** permet d'approfondir cette notion.

SITUATION 3

Cette situation aborde la notion d'environnement électronique des protons.

Les protons dans cette molécule sont liés à des atomes d'électronégativités différentes et ont des positions distinctes : certains sont proches d'atomes de carbone, d'autres d'atomes d'azote, d'autres encore d'atomes d'oxygène ; certains protons sont en périphérie de la molécule, d'autres sont confinés à l'intérieur.

L'**activité 3** développe l'importance de cette notion dans le cadre de la RMN.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

RMN : découverte et applications

p. 106

1. RMN : résonance magnétique nucléaire.
2. Lorsque certains noyaux atomiques sont placés dans un champ magnétique, ils peuvent changer de niveau d'énergie sous l'effet d'une onde électromagnétique : c'est le phénomène de RMN (voir figure 1 du cours).
3. L'induction magnétique est l'apparition d'un courant électrique dans un conducteur fermé dû à une variation de champ magnétique.
4. Le déplacement chimique caractérise un noyau dans un environnement électronique donné, il dépend donc de la nature des atomes qui l'entourent, de leur proxi-

mité, etc. Le déplacement chimique d'un noyau est d'autant plus faible que la densité d'électrons qui l'entoure est élevée.

5. a. Un noyau d'hydrogène est constitué d'un proton uniquement.

b. Étudier le comportement d'un noyau d'hydrogène revient donc à étudier celui du proton qui le constitue.

6. I. I. Rabi : prix Nobel de Physique, découvre le phénomène de RMN.

F. Bloch et E. M. Purcell : prix Nobel de Physique, premières mesures de RMN par technique d'induction utilisée aujourd'hui.

W. Proctor et W. Dickinson : introduisent la notion de déplacement chimique.

7. Les principales applications de la RMN touchent la biologie, pour la détermination de la structure de macromolécules telles que les protéines, et la médecine dans le cadre de l'imagerie médicale avec l'IRM.

8. D'après la question **4**, le déplacement chimique permet d'accéder à l'environnement électronique d'un atome. La RMN du proton, d'après la question **5**, permet d'étudier l'environnement électronique des atomes d'hydrogène constituant les molécules. On peut ainsi connaître le type d'atomes qui les entourent (plus ou moins électro-négatifs, ayant un cortège électronique plus ou moins important), leur proximité, leur quantité, etc. Et ainsi, on peut aboutir à la structure de la molécule et aux propriétés du milieu dans lequel elle se trouve.

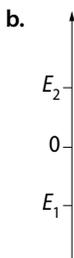
ACTIVITÉ 2

Protons et champ magnétique

p. 107

1. a. Un proton dans un champ magnétique d'intensité B peut avoir deux énergies possibles :

$$E_1 = -\mu \cdot B \text{ et } E_2 = \mu \cdot B.$$



2. a. On a $\Delta E = h \cdot \nu$.

b. On a $\Delta E = E_2 - E_1 = \mu \cdot B - (-\mu \cdot B) = 2\mu \cdot B$. Donc $h \cdot \nu = 2\mu \cdot B$. Ainsi, $\nu = (2\mu/h) \cdot B$.

ν et B sont donc proportionnels.

c. On a $\nu \approx (2 \times 1,41 \times 10^{-26} / (6,63 \times 10^{-34})) \times 1 \approx 4 \times 10^7 \text{ Hz}$: de l'ordre de 10^7 Hz , soit 10 MHz.

d. On a, par analyse dimensionnelle : $[\mu] = [h \cdot \nu / (2B)] = [\text{énergie}] \times [\text{temps}] \times [\text{fréquence}] / [\text{champ magné-}$

$\text{tique}] = [\text{énergie}] / [\text{champ magnétique}]$. Le moment magnétique nucléaire s'exprime donc en $J \cdot T^{-1}$.

3. a. Les niveaux d'énergie d'un proton dépendent du champ magnétique perçu. Et le champ magnétique perçu par un proton est d'autant plus faible que la densité d'électrons autour de lui est élevée (les électrons gênent le proton dans sa perception du champ magnétique imposé).

b. La fréquence de résonance est proportionnelle au champ magnétique perçu. Le champ magnétique perçu est d'autant plus faible que la densité électronique autour du proton est élevée. Ainsi, plus la densité d'électrons autour du proton est élevée, plus sa fréquence de résonance est faible.

ACTIVITÉ 3

Identifier des molécules

p. 108

Remarque : pour cette activité, les élèves devront déjà avoir abordé la notion de déplacement chimique.

1. a. Pour la molécule **A** : sur le H de l'atome de carbone portant les deux atomes de chlore (carbone n° 1), les atomes du plus proche au plus éloigné sont :



Sur les deux H du carbone n° 2 : $C/Cl, C, H/Cl, Cl, H$.

Pour la molécule **B** : pour les trois H : $C/H, H, C/Cl, Cl, Cl$.

b. Dans la molécule **B**, les trois protons ont le même entourage.

c. Les deux atomes d'hydrogène portés par l'atome de carbone n° 2 ont le même entourage, ils peuvent être regroupés. L'autre proton reste seul.

d. Le spectre de la molécule **B** est celui qui ne comporte qu'un seul pic car tous ses protons ont le même entourage. Le spectre de la molécule **A** est celui qui possède deux pics car elle contient deux groupes de protons équivalents.

2. a. L'électronégativité est la capacité qu'a un atome à attirer les électrons vers lui des liaisons covalentes dans lesquelles il est impliqué.

L'atome de chlore est plus électro-négatif que l'atome de carbone, les électro-négativités des atomes de carbone et d'hydrogène sont équivalentes.

b. Le proton porté par l'atome de carbone n° 1 de la molécule **A** est relié, après l'atome de carbone, à deux atomes de chlore et un atome de carbone. Il est donc entouré de la densité électronique la plus faible. Les deux autres protons de la molécule **A** sont reliés, après l'atome de carbone, à un atome de chlore, un atome de carbone et un atome d'hydrogène. Il est donc entouré d'une densité électronique plus élevée que les protons du groupe précédent. Et les protons de la molécule **B** sont reliés, après l'atome de carbone, à deux atomes d'hydrogène, et un atome de carbone, qui sont tous

trois très peu électronégatifs. La densité électronique autour de ces protons est donc plus importante que pour tous les autres protons.

c. Le déplacement chimique d'un groupe de protons est d'autant plus élevé que la densité électronique autour de ces protons est faible. D'après la réponse précédente, le groupe de protons de la molécule **B** a le déplacement chimique le plus faible car il est entouré de la plus forte densité électronique. Le groupe des deux protons portés par l'atome de carbone n° 2 de la molécule **A** ont un déplacement chimique plus élevé que le précédent. Et le proton porté par le carbone n° 1 de la molécule **A** possède le déplacement chimique le plus élevé.

3. a. Le groupe de protons de la molécule **B** n'a pas de protons voisins. Le proton seul porté par l'atome de carbone n° 1 de la molécule **A** possède deux protons voisins. Le groupe des deux protons portés par l'atome de carbone n° 2 de la molécule **A** possède 1 proton voisin.

b. Le groupe de protons de la molécule **B** est représenté par un pic. Le proton seul porté par l'atome de carbone n° 1 de la molécule **A** est représenté par 3 pics. Le groupe des deux protons portés par l'atome de carbone n° 2 de la molécule **A** est représenté par 2 pics.

c. Un groupe de protons équivalents est représenté par un groupe de « nombre de voisins + 1 » pics.

4. Le nombre de pics – ou de groupes de pics – correspond au nombre de groupes de protons équivalents dans la molécule.

La valeur du déplacement chimique permet d'identifier les atomes qui entourent le groupe de protons en question de part leur électro-négativité.

La multiplicité du groupe de pics permet de connaître le nombre de protons voisins du groupe de protons équivalents.

ACTIVITÉ 4

Interpréter la hauteur des pics

p. 109

Remarque : pour cette activité, les élèves devront déjà avoir abordé la notion de déplacement chimique et de multiplicité des pics.

1. a. Il y a trois groupes de protons équivalents dans cette molécule.

b. Le groupe de protons porté par l'atome de carbone n° 1 possède 2 protons voisins. Celui porté par l'atome de carbone n° 2 possède 5 protons voisins. Celui porté par l'atome de carbone n° 3 possède 2 protons voisins.

c. Le groupe de protons porté par l'atome de carbone n° 1 engendre un triplet. Celui porté par l'atome de carbone n° 2 engendre un sextuplet. Celui porté par l'atome de carbone n° 3 engendre un triplet.

d. L'atome de carbone n° 1 porte un atome de chlore très électro-négatif. Les protons portés par ce même atome de carbone sont donc très déblindés. Ils ont

le déplacement chimique le plus important. Plus on s'éloigne de cet atome de carbone, moins les protons sont déblindés. Donc le groupe de protons porté par l'atome de carbone n° 2 engendre le sextuplet de déplacement chimique moindre que celui du triplet précédent et le groupe de protons porté par l'atome de carbone n° 3 engendre un triplet de déplacement chimique le plus faible.

2. a. Le triplet engendré par le groupe de protons porté par l'atome de carbone n° 1 est plus bas que l'autre.

b. Les deux groupes engendrant les triplets ne sont pas constitués du même nombre de protons : le groupe porté par l'atome de carbone n° 1 possède 2 protons. Celui porté par l'atome de carbone n° 3 en possède 3.

c. Pour deux groupes de pics de même multiplicité, la hauteur des pics est d'autant plus importante que le nombre de protons du groupe engendrant ce pic est élevé.

3. a. Les pics du sextuplet sont tous plus bas que ceux du triplet.

b. Les groupes de protons équivalents engendrant ces deux multiplets possèdent chacun deux protons.

c. Aire sous le triplet = $256 + 508 + 249 = 1\ 013$; aire sous le sextuplet = $31 + 159 + 321 + 315 + 155 + 33 = 1\ 014$. Les aires sous ces deux multiplets sont égales.

d. Ces deux multiplets sont engendrés par des groupes de protons possédant un même nombre de protons et présentent une aire identique. On peut penser que l'aire sous un multiplet dépend directement du nombre de protons présents dans le groupe qui l'engendre.

4. a. Les paliers de la courbe d'intégration ont pour hauteur relative 2 ; 2 ; 3.

b. La hauteur des paliers de la courbe d'intégration permet d'accéder au nombre de protons dans chaque groupe de protons équivalents.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : Savoir ce qu'est le déplacement chimique en RMN

1. **Faux.** Ce n'est qu'en présence d'un champ magnétique extérieur qu'un proton présente deux niveaux d'énergie.

2. **Faux.** Si la densité électronique autour d'un proton augmente, il perçoit un champ magnétique moins intense et la fréquence de résonance est donc plus faible.

3. **Faux.** Un proton lié à un atome plus électro-négatif voit la densité électronique qui l'entoure baisser, donc son blindage diminuer.

4. **Vrai.**

2 1. c.

2. a et c.

3. a, b et c.

3 1. a. Si l'électronégativité de l'atome voisin du proton augmente, il attire davantage les électrons vers lui et la densité électronique autour du proton diminue.

b. Dans ce cas, le déplacement chimique du proton augmente car il est plus déblindé.

2. a. Tous les hétéroatomes de ces molécules sont des halogènes. Quand on monte sur une même colonne dans la classification périodique, l'électronégativité augmente. Donc les éléments du plus au moins électronégatif sont : F – Cl – Br – I.

b. D'après 1. b., le déplacement chimique de CH₃F vaut 4,25 ppm, celui de CH₃Cl vaut 3,00 ppm, celui de CH₃Br vaut 2,70 ppm et celui de CH₃I vaut 2,15 ppm.

4 1. a. La densité électronique autour des protons du TMS est très élevée car le silicium est moins électronégatif que le carbone.

b. La fréquence mettant en résonance les protons du TMS est donc plus faible que pour les autres molécules étudiées.

2. a. On a $\delta_i = 10^6((v_i - v_{\text{réf}})/v_0)$ avec δ_i le déplacement chimique du proton considéré, v_i la fréquence mettant en résonance ce proton, $v_{\text{réf}}$ la fréquence mettant en résonance les protons de la référence et v_0 la fréquence du rayonnement envoyé sur l'échantillon.

b. Le déplacement chimique des protons du TMS vaut 0.

3. Le spectre présente deux pics : un à 0 ppm et l'autre à 3,5 ppm.

5 Le chlore est un élément très électronégatif. Plus il y en a à proximité d'un proton, plus celui-ci est déblindé, plus son déplacement chimique est important. Le spectre **a** est donc celui de la molécule CHCl₃, le **b** est celui de la molécule CH₂Cl₂, et le **c** celui de la molécule CH₃Cl.

COMPÉTENCE 2 : Identifier les protons équivalents et relier la multiplicité du signal au nombre de voisins

6 1. Ont toujours.

2. Peuvent être.

3. Quadruplet.

4. 1 proton voisin.

7 1. Des protons équivalents ont le même environnement chimique dans une molécule.

2. Les protons voisins sont les protons portés par le carbone lié directement à celui qui porte le groupe de protons équivalents.

3. Il y a autant de signaux que de groupes de protons équivalents dans la molécule.

4. Le signal engendré par un groupe de protons équivalents présente « nombre de voisins + 1 » pics.

8 1. Les trois protons portés par l'atome de carbone sont équivalents. Les deux protons portés par l'atome d'azote sont équivalents, et non équivalents aux premiers.

2. Cette molécule possède deux groupes de protons équivalents, elle a donc deux signaux sur son spectre RMN.

3. Le groupe des trois protons portés par l'atome de carbone possèdent deux protons voisins, il génère donc un triplet. Le groupe des deux protons portés par l'atome d'azote possède trois protons voisins, il génère donc un quadruplet.

10 1. Le spectre présente trois multiplets, la molécule a donc trois groupes de protons équivalents.

2. Sa formule développée est donc :

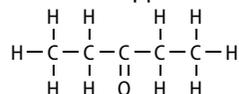
$$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ | \quad | \quad | \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{Br} \\ | \quad | \quad | \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \end{array}$$

3. Les deux protons portés par l'atome de carbone qui porte l'atome de brome ont deux protons voisins (et le plus fort déplacement chimique car le brome est très électronégatif), ils sont donc représentés par un triplet. Les deux protons portés par l'atome de carbone central ont 5 protons voisins, ils sont donc représentés par un sextuplet, et les trois protons portés par l'atome de carbone extrême ont deux protons voisins, ils sont donc représentés par un triplet.

11 1. Cette molécule contient deux groupes de protons équivalents.

2. Le groupe de protons qui donne le triplet possède deux protons voisins, et celui qui génère le quadruplet possède trois protons voisins.

3. La molécule possède 10 protons, elle a donc une symétrie, sa formule développée est :



COMPÉTENCE 3 : Utiliser l'intégration d'un signal et relier un spectre RMN simple à une molécule organique donnée

12 1. a.

2. d.

13 1. Dépend.

2. Les proportions.

3. Ne dépend pas.

14 Courbe d'intégration et nombre de protons

1. Quelle est l'utilité de la courbe d'intégration du spectre RMN ?

La courbe d'intégration permet de déterminer les proportions des protons dans les différents groupes de protons équivalents.

2. La courbe d'intégration du signal RMN d'une molécule possédant 8 protons présente un palier de hauteur 3 et un palier de hauteur 1.

a. Combien de groupes de protons équivalents possède-t-elle ?

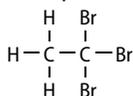
La courbe d'intégration de la molécule comporte deux paliers, elle contient donc deux groupes de protons équivalents.

b. Combien y a-t-il de protons dans chaque groupe de protons équivalents ?

Les proportions des protons dans les deux groupes sont 3 pour 1 et la molécule contient 8 protons, il y a donc un groupe de 6 protons équivalents et un groupe de 2 protons équivalents.

15 1. a. Cette molécule possède un groupe de protons équivalents. Autrement dit, tous les protons de la molécule sont équivalents.

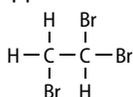
b. Cette molécule a donc pour formule développée :



2. a. Cette molécule possède deux groupes de protons équivalents car sa courbe d'intégration a deux paliers.

b. Les proportions des protons dans les groupes sont 2 : 1, avec un total de 3 protons dans la molécule, il y a donc un groupe de 2 protons équivalents et un groupe de 1 proton.

c. La formule développée de la molécule est donc :

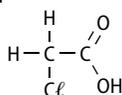


16 1. Le déplacement chimique à 3,6 ppm indique la présence d'une fonction halogénée, ici, chloro ; le déplacement chimique à 10,5 ppm indique la présence d'une fonction acide carboxylique.

2. Il y a deux groupes de protons équivalents car deux signaux et deux paliers dans la courbe d'intégration, avec un proton dans le groupe qui résonne à 10,5 ppm et deux protons dans le groupe qui résonne à 3,6 ppm.

3. Les signaux sont des singulets, tous les groupes de protons équivalents n'ont aucun proton voisin.

4. Cette molécule a pour formule :



EXERCICES DE SYNTHÈSE

18 1. Le spectre révèle 4 groupes de protons équivalents.

2. La molécule **a** comporte 2 groupes de protons équivalents : un de 6 protons qui a 2 protons voisins, et un de 4 protons qui a 3 protons voisins. La molécule **b** comporte 3 groupes de protons équivalents : un de 3 protons qui n'a pas de proton voisin, un de 1 proton qui a 6 protons voisins, et un de 6 protons qui a un proton voisin. La molécule **c** comporte 4 groupes de protons équivalents : un de 3 protons qui n'a pas de proton voisin, un de 2 protons qui a 2 protons voisins, un autre de deux protons qui a 5 protons voisins, et un de 3 protons qui a 2 protons voisins.

3. Le spectre est donc celui de la molécule **c**.

4. Le singulet de hauteur 3 correspond au groupe de 3 protons porté par l'atome de carbone n° 1 (lié au carbone fonctionnel), il n'a aucun proton voisin. Le sextuplet de hauteur 2 correspond au groupe de 2 protons portés par l'atome de carbone n° 4 qui a 5 protons voisins. Le triplet de hauteur 2 correspond au groupe de 2 protons porté par l'atome de carbone n° 3 qui a 2 protons voisins, et le triplet de hauteur 3 correspond au groupe de 3 protons porté par l'atome de carbone n° 5 qui a 2 protons voisins.

19 1. Les seules fonctions oxygénées qui génèrent un déplacement chimique inférieur à 3 sont les fonctions alcool et cétone. Cette molécule n'étant pas un alcool, c'est donc une fonction cétone que contient la molécule.

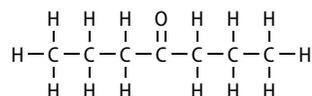
2. a. et b. La molécule possède 3 groupes de protons équivalents dans les proportions 2/2/3 avec un total de 14 protons, soit 6 protons dans un groupe et 4 protons dans chacun des deux autres.

c. $\delta = 0,9$ ppm : groupe de 6 protons voisins de 2 protons (triplet).

$\delta = 1,6$ ppm : groupe de 4 protons voisins de 5 protons (sextuplet).

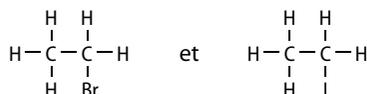
$\delta = 2,4$ ppm : groupe de 4 protons voisins de 2 protons (triplet).

3. Cette molécule a pour formule :



20 1. a. Dans chaque molécule, il y a deux groupes de protons équivalents car deux groupes de pics.

b. Les formules développées de ces molécules sont :



c. Dans ces deux molécules, un groupe comporte 3 protons équivalents et possède 2 protons voisins, il est donc représenté par le triplet. Un autre groupe comporte 2 protons équivalents et possède 3 protons voisins, il est représenté par le quadruplet.

2. a. Les éléments brome et iode sont très électro-négatifs, la densité électronique des protons se trouvant à proximité de ces atomes est donc faible, leur déplacement chimique sera donc plus élevé que celui des autres protons.

b. Le brome est au-dessus de l'iode dans la classification périodique des éléments, il est plus électro-négatif que ce dernier, il attire donc davantage les électrons. Les protons à proximité du brome seront donc plus déblindés que ceux qui se trouvent à proximité de l'iode, ils auront donc un déplacement chimique plus élevé. Le spectre **b** est donc celui du C_2H_5Br . Le spectre **a** est celui du C_2H_5I .

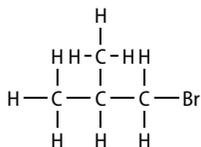
21 1. La molécule contient une fonction cétone. Un proton lié à un carbone voisin d'une fonction cétone a un déplacement chimique de 2 à 2,7 ppm. Donc les trois protons équivalents liés au carbone voisin de la fonction cétone sont représentés par le pic le plus haut. Le proton restant est donc représenté par le singulet de déplacement chimique plus élevé.

2. La courbe d'intégration présente, en partant de la gauche, un palier de hauteur 1 au niveau du premier singulet (car un seul proton est présent dans le groupe), et un palier de hauteur 3 au niveau du deuxième singulet (de déplacement chimique plus faible), car ce groupe contient trois protons.

23 1. a. Les deux premiers multiplets ont un déplacement chimique inférieur à 4 ppm, le multiplet généré par les protons voisins de l'atome de brome est donc le doublet qui se trouve à 3,4 ppm, qui est bien compris entre 2,5 et 4 ppm.

b. Il s'agit d'un doublet, ils ont donc un proton voisin.

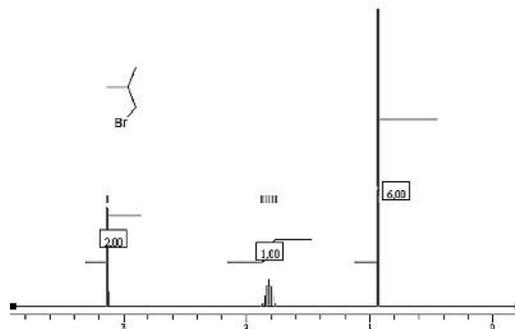
c. La molécule a donc pour formule développée :



2. a. Le groupe de 9 pics provient du proton voisin des deux considérés précédemment qui a 8 protons voisins. Ce proton est proche (sans être voisin) de l'atome de brome, et est donc plus déblindé que les 6 derniers protons. Ces 6 protons ont 1 proton voisin et génèrent donc un doublet à faible déplacement chimique.

b. La molécule possède 3 groupes de protons équivalents, la courbe d'intégration aura donc 3 paliers : un palier de hauteur 2 à 3,2 ppm, un autre de hauteur 1 à 1,9 ppm et un dernier de hauteur 6 à 0,9 ppm.

c. Après avoir dessiné la molécule, on trouve une courbe d'intégration qui correspond à la réponse donnée.

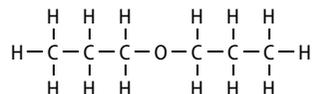


24 1. a. Les valeurs de déplacements chimiques sont inférieures à 3,5 ppm, et ces molécules ne sont pas des alcools d'après l'énoncé, l'oxygène est donc impliqué dans une liaison C-O-C.

b. Dans cette molécule, il y a 3 groupes de protons équivalents, et 14 protons en tout. D'après le signal d'intégration, il y a donc un groupe de 6 protons équivalents et deux groupes de 4 protons équivalents chacun.

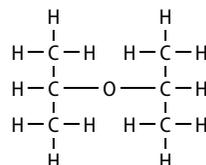
c. Il n'y a que trois groupes de protons équivalents pour 6 atomes de carbone dans la molécule. Celle-ci présente donc une symétrie par rapport à l'atome d'oxygène.

d. La molécule a donc pour formule développée :



e. Les protons les plus proches de l'atome d'oxygène sont représentés par le triplet à 3,4 ppm, ils ont en effet 2 protons voisins. Ceux-ci sont un peu moins déblindés et sont représentés par le sextuplet centré sur 1,5 ppm, ils ont en effet 5 protons voisins. Les protons portés par les atomes de carbone extrêmes sont représentés par les triplets à 1 ppm, ils sont en effet 2 protons voisins. Il y a 4 protons dans le 1^{er} groupe présenté, 4 dans le 2^e, et 6 dans le 3^e. La hauteur du signal d'intégration peut être 4, 4, 6, ou, ce qui revient au même en divisant le tout par 2 : 2, 2, 3, ce qui correspond aux valeurs présentées.

2. a. et b. De même que précédemment, l'atome d'oxygène est impliqué dans une liaison C-O-C. La molécule possède 2 groupes de protons équivalents : un de 12 protons et un de 2 protons. La molécule présente nécessairement une symétrie par rapport à l'atome d'oxygène. Il y a donc 2 protons voisins de l'atome d'oxygène possédant chacun 6 protons voisins. La molécule a donc pour formule développée :

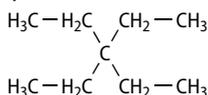


25 1. Il y a dans cette molécule deux groupes de protons équivalents. Les proportions du nombre de protons des deux groupes sont 2/3. Or, il y a 20 protons en tout dans la molécule. Il y a donc 8 protons équivalents qui génèrent le quadruplet à 1,2 ppm et 12 protons équivalents qui génèrent le triplet à 0,7 ppm.

2. Les protons du groupe qui résonne à 1,2 ppm ont 3 protons voisins, et les autres ont 2 protons voisins.

3. Les nombres obtenus sur le signal d'intégration sont à multiplier par 4 pour obtenir le nombre de protons de chaque groupe de protons équivalents, on peut donc dire qu'il y a une double symétrie dans la molécule.

4. La molécule a pour formule développée :



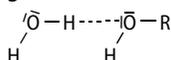
5. Les 12 protons équivalents extrêmes ont chacun 2 protons voisins, ils sont représentés par le triplet. Les autres ont chacun 3 protons voisins, ils sont représentés par le quadruplet. Les proportions de protons sont 12/8, ce qui revient, en divisant par 4, à une proportion de 3/2, ce qui correspond au signal d'intégration présenté.

EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

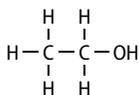
26 1. a. Une liaison hydrogène s'établit entre un atome d'hydrogène lié à un atome très électronégatif (oxygène, azote ou fluor) et un autre atome électronégatif (oxygène, azote ou fluor).

b. Les deux atomes intervenant dans la liaison hydrogène sont le proton de la fonction alcool d'une molécule avec l'atome d'oxygène d'une autre molécule d'alcool.

c. La liaison hydrogène se schématise comme suit :



2. a. L'éthanol a pour formule développée :



b. Le proton de la fonction alcool est représenté par le singulet à 2,8 ppm.

c. Les deux protons équivalents voisins de l'atome d'oxygène sont plus déblindés que les autres (l'oxygène est un élément très électronégatif), et ils ont 3 protons voisins car ils ne « voient » pas le proton de la fonction alcool. Ils sont donc représentés par un quadruplet à déplacement chimique plus élevé que les autres, ici à 3,7 ppm environ. Les trois derniers protons sont équivalents et ont 2 protons voisins, ils sont donc représentés par un triplet à faible déplacement chimique, ici à 1,3 ppm environ.

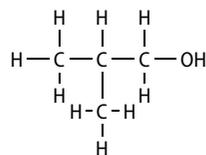
d. Le spectre d'intégration comporte 3 paliers : un de hauteur 2 à 3,7 ppm pour les deux protons du carbone portant la fonction alcool, un palier de hauteur 1 à 3,7 ppm pour le proton de la fonction alcool, et un palier de hauteur 3 pour les trois protons restants.

e. Si le proton de la fonction alcool ne se déplaçait pas sous l'effet de liaison hydrogène, on aurait un quintuplet au lieu du quadruplet et un triplet au lieu du singulet.

3. a. D'après les valeurs de déplacements chimiques, l'atome d'oxygène peut être impliqué soit dans un enchaînement C-O-C, soit dans une fonction alcool.

b. Si la molécule contenait la fonction cétone, il y aurait seulement 9 atomes d'hydrogène dans la molécule, ce qui contredit la formule brute. S'il s'agissait d'un enchaînement C-O-C, tous les protons auraient des protons voisins, il n'y aurait que des pics de multiplicité supérieure ou égale à 2. D'après le texte de l'exercice précédent, le proton de la fonction alcool peut être mis en évidence par un singulet d'amplitude 1, ce qu'on trouve bien sur le spectre. Il s'agit donc d'un alcool.

c. Le groupe de 9 pics et de hauteur 1 montre l'existence d'un groupe de protons contenant un unique proton et voisin de 8 protons. C'est un proton impliqué dans une structure de la forme $-\text{H}_2\text{C}-\text{HC}(-\text{CH}_3)_2$. La molécule a donc pour formule développée :



d. Cette molécule est le 2-méthylpropan-1-ol.

1 1. a. L'atténuation d'un rayonnement provenant de l'Univers ne dépend pas que de sa longueur d'onde mais aussi de l'altitude.

b. L'intérêt d'utiliser des sondes spatiales pour explorer l'Univers est d'avoir accès à l'ensemble du spectre électromagnétique sans qu'il y ait d'atténuation.

2. a. La seule exploration de l'Univers par le domaine visible en limite notre connaissance car ce domaine du spectre électromagnétique est relativement étroit.

b. On peut expliquer que jusqu'en 1948, il était difficile d'explorer un autre domaine du spectre électromagnétique que celui du domaine du visible car seules les instruments optiques d'observation étaient développés.

c. L'œil est un exemple de détecteur naturel du rayonnement visible.

3. Il existe une autre « fenêtre » sur l'Univers pour laquelle on peut observer le rayonnement émis par les objets astronomiques, il s'agit du domaine des rayonnements radio.

4. a. Le domaine du spectre électromagnétique concerné ici est le domaine des rayonnements radio.

b. D'après le document photographique, les rayonnements sont collectés par une parabole qui permet de les concentrer vers le détecteur où ils sont détectés.

2 1. a. Une onde transversale est une onde dont la direction de la perturbation est perpendiculaire à la direction de propagation.

b. Le schéma **a** correspond à des ondes de compression donc aux ondes P.

Le schéma **b** correspond à des ondes transversales donc aux ondes S.

2. a. Les ondes P sont les plus rapides, donc elles correspondent au train d'ondes A.

Les ondes S sont les moins rapides, donc elles correspondent au train d'ondes B.

b. Le début du séisme a été détecté à Eureka à 8 h 15 min 20 s TU (Temps Universel) au bout de 40 s, donc le séisme s'est déclenché à l'épicentre à 8 h 14 min 40 s.

c. $d = v_p \cdot \Delta t_p$
 $d = 10 \times 40 = 400 \text{ km.}$

d. $v_s = d/\Delta t_s$
 $v_s = 400/65 = 6,2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}.$

3 1. La durée $\Delta t(G)$ du parcours de l'onde dans l'hémisphère gauche est la différence des dates correspondant aux pics P_1 et P_2 : $\Delta t(G) = 160 - 10,0 = 150 \text{ ms}$. De même, la durée $\Delta t(D)$ du parcours de l'onde dans l'hémisphère droit est la différence des dates correspondant aux pics P_2 et P_3 : $\Delta t(D) = 310 - 160 = 150 \text{ ms}$.

2. Pendant la durée $\Delta t(G)$, l'onde a parcouru deux fois la largeur de l'hémisphère gauche soit la distance $2L$. Dans le cerveau, la célérité des ultrasons est $v = 1\,500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ donc $2L = v \cdot \Delta t(G)$, d'où :

$$L = v \cdot \Delta t(G)/2, \text{ soit } L = 1\,500 \times 150 \times 10^{-6}/2 = 0,112 \text{ m} = 112 \text{ mm.}$$

Les deux hémisphères ont la même largeur (112 mm) car la durée de parcours de l'onde ultrasonore est la même.

4 1. a. La hauteur d'un son est la fréquence de son fondamental.

b. À l'oscillogramme, on détermine la durée de quatre périodes :

$$4T = 0,009 \text{ s}$$

donc $T = 0,002\,25 \text{ s}$

d'où $f_1 = 1/T = 440 \text{ Hz}$.

c. La note jouée est donc la la_3 .

2. a. Le son n'est pas un son pur car il y a plusieurs harmoniques dans son spectre.

b. $f_2 = 2f_1 = 880 \text{ Hz}$.

$f_{13} = 13f_1 = 5\,720 \text{ Hz}$.

c. Ce qui différencie la note jouée par ce violon et la même note jouée par une flûte est le nombre et l'amplitude des harmoniques, autrement dit le timbre.

3. a. On mesure le niveau d'intensité sonore dans un sonomètre ou décibelmètre.

b. $I = I_0 \cdot 10^{L/10}$ avec $L = 60 \text{ dB}$, donc :

$$I = 1,0 \times 10^{-12} \times 10^{60/10} = 1,0 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

5 A. Un véhicule muni d'une sirène est immobile.

a. Faux. Une onde sonore est une onde de compression donc longitudinale.

b. Faux. Une onde mécanique se propage dans un milieu matériel sans transport de matière.

c. Faux. $v = \lambda \cdot f$ donc $\lambda = v/f$

donc $\lambda = 340/680 = 0,500 \text{ m}$.

Donc un point M distant du point S d'une longueur égale à 51,0 m du milieu reproduit le mouvement de la source S.

$v = d/\Delta t$ donc $\Delta t = d/v$

donc $\Delta t = 51,0/340 = 0,150 \text{ s}$.

d. Faux. $v = d/\Delta t$ donc $d = v \cdot \Delta t = v \cdot 3T = v \cdot 3/f$
 $= 3\lambda$

donc $d = 3 \times 0,500 = 1,50 \text{ m}$.

e. Vrai. $\lambda = 0,50 \text{ m}$ donc deux points situés à la distance $d' = 55,0 \text{ m} = 110\lambda$ l'un de l'autre dans la même direction de propagation vibrent en phase.

B. 1. a. $v = \lambda \cdot f$ donc $\lambda = v/f$.

b. $\lambda' = \lambda - u \cdot T$ donc $v/f' = v/f - u/f = (1/f) \cdot (v - u)$
 donc $f'/v = f/(v - u)$

donc $f' = f \cdot \frac{v}{v - u}$.

c. $f' > f$ donc le son perçu est plus aigu que le son d'origine.

$$d. f' = f \cdot \frac{v}{v-u}$$

$$\text{donc } f' \cdot (v-u) = f' \cdot v - f' \cdot u = f \cdot v$$

$$\text{donc } u = v \cdot (f' - f) / f'$$

$$u = \frac{340 \times (716 - 680)}{716} \times 3,6 = 62 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$2. a. f'' = f \cdot \frac{v}{v+u}$$

b. $f'' < f$ donc le son perçu est plus grave que le son d'origine.

6 1. a. $\tan \theta \approx \theta$

$$\tan \theta = (L/2)/D$$

$$\text{donc } \theta = L/2 \cdot D.$$

b. $\theta = \lambda/a$ avec θ en rad, λ et a en m.

2. La courbe est une droite passant par l'origine. Ce qui signifie que θ est proportionnel à $\frac{1}{a}$. Donc la courbe

obtenue est en accord avec l'expression de θ donnée à la question 1.

3. a. $\theta = \lambda/a$ donc λ correspond à la pente de la droite.

b. D'après la courbe, pour $(1/a) = 4,0 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$, on a :
 $\theta = 2,25 \times 10^{-2} \text{ rad}$.

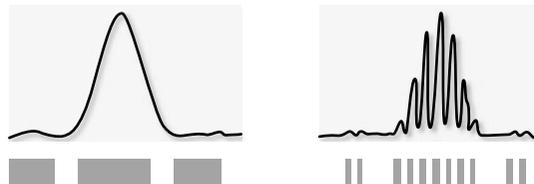
Comme $\theta = \lambda/a$, $\lambda = \theta \cdot a$.

$$\lambda = 2,25 \times 10^{-2} / (4,0 \times 10^4) = 0,560 \times 10^{-6} = 560 \text{ nm}.$$

7 1. a. Le laser et une fente : courbe a et phénomène de diffraction.

Le laser et les fentes de Young : courbe b et phénomène d'interférences.

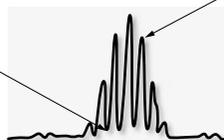
b.



2. a.

interférence destructive

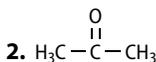
interférence constructive



b. On peut utiliser par exemple un laser d'une autre couleur et montrer que la figure d'interférences est modifiée.

3. Si on éloigne la barrette CCD des fentes de Young, la distance D augmente donc les interférences seront plus grandes.

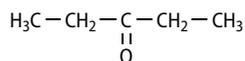
8 1. Elles possèdent le groupe carbonyle C=O.



3. ① : C=O, ② : C-H, ③ : CH₃-C=O

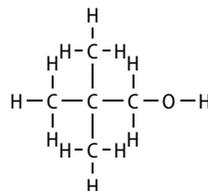
4. Le spectre RMN de la propanone est constitué d'un singulet entre 2 et 2,7 ppm.

5. Il y a un triplet et un quadruplet correspondant à deux groupes de protons équivalents portant 2 H et 3 H, soit CH₂ et CH₃. Il y a cinq atomes de carbone, dont celui portant le groupe carbonyle qui doit être le carbone numéro 3 pour que la cétone soit symétrique. Il s'agit donc de la pentan-3-one :



9 1. Des isomères sont des composés ayant la même formule brute mais des formules développées (ou semi-développées) différentes.

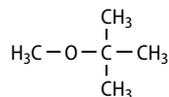
2. Le spectre infrarouge de A indique la présence d'une fonction alcool (bande vers 3 600 cm⁻¹), ce qui est confirmé par le singulet à 4,1 ppm (δ entre 1 et 6 ppm). Le spectre RMN montre, avec ses 3 singulets dans le rapport 9/2/1, que la formule de A est :



C'est le 2,2-diméthylpropan-1-ol.

3. Le spectre RMN de B comporte deux singulets dans le rapport 3/1. L'un, à 1,1 ppm, correspond à trois groupes méthyle liés à un atome de carbone et l'autre, à 3,1 ppm, correspond à un groupe méthyle directement lié à un atome d'oxygène.

B a pour formule semi-développée :



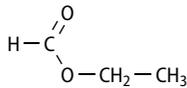
10 1. Le singulet à 0 ppm correspond à la référence, le TMS.

2. La bande à 1 740 cm⁻¹ est caractéristique des esters.

3. Le spectre présente :

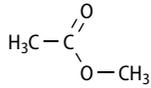
- un singulet à 8 ppm correspondant au proton d'un ester H-COO-R ;
- un quadruplet à 4,1 ppm correspondant à un groupe -CH₂ lié à O ;
- un triplet à 1,2 ppm correspondant à un groupe -CH₃.

La molécule a donc pour formule semi-développée :



4. Il s'agit du méthanoate d'éthyle.

5. L'éthanoate de méthyle a pour formule :



Son spectre RMN présente deux singulets de même hauteur entre 2-2,7 ppm et 3-4,1 ppm.

11 1. Le groupe hydroxyle OH.

2. Il s'agit de la fonction alcool.

3. La bande caractéristique correspondant à la vibration de la liaison O-H se situe vers 3 200-3 500 cm^{-1} .

4. Dans le thymol pur, il y a création de liaisons hydrogène et l'on a une bande large correspondant à la liaison O-H vers 3 200-3 500 cm^{-1} .

Par dilution, ces liaisons hydrogène disparaissent et la bande est fine vers 3 600-3 700 cm^{-1} .

5. a. Pour la forme acide, le maximum d'absorption se situe à 440 nm, soit dans le bleu : la couleur observée est jaune.

b. Pour la forme basique, le maximum d'absorption est dans le rouge ($\lambda_{\text{max}} = 630 \text{ nm}$) : elle apparaît cyan.

Diffraction et interférences

1. Ces enregistrements montrent que l'enveloppe de la figure d'interférences par deux fentes de largeur a correspond à la figure de diffraction par une fente de largeur a .

2. La source de lumière utilisée est une source monochromatique. On a des extinctions à des intervalles réguliers.

La diffraction ou les interférences obtenues par une lumière polychromatique se traduisent par des irisations (ce qui réduit la présence des extinctions).

3. Sur l'enregistrement :

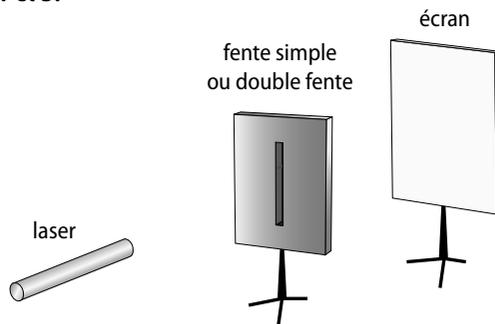
$$\theta = \frac{\lambda}{a}$$

Sur le schéma :

$$\sin \theta \approx \theta = \frac{L/2}{D}$$

$$\text{Donc } \frac{L/2}{D} = \frac{\lambda}{a}, \text{ soit } L = \frac{2D \cdot \lambda}{a}$$

4. et 5.



$$6. L = \frac{2D \cdot \lambda}{a} \text{ donc } \lambda = \frac{a \cdot L}{2D}$$

Exemple :

$a = 30 \mu\text{m}$; $D = 0,75 \text{ m}$; $L = 3,2 \text{ cm}$.

On en déduit $\lambda = 630 \text{ nm}$ (laser rouge).

7. Exemple :

$i = 3 \text{ mm}$; $D = 0,75 \text{ m}$; $\lambda = 630 \text{ nm}$; $b = 150 \mu\text{m}$;

$$\frac{\lambda \cdot D}{b} = 3,1 \text{ mm} = i$$

Mouvements et quantité de mouvement

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
<ul style="list-style-type: none"> – Description du mouvement d'un point au cours du temps : vecteurs position, vitesse et accélération. – Référentiel galiléen. – Principe d'inertie. – Conservation de la quantité de mouvement d'un système isolé. 	<ul style="list-style-type: none"> – Choisir un référentiel d'étude. – Définir et reconnaître des mouvements (rectiligne uniforme, rectiligne uniformément varié, circulaire uniforme, circulaire non uniforme) et donner dans chaque cas les caractéristiques du vecteur accélération. – Définir la quantité de mouvement \vec{p} d'un point matériel.

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Choisir un référentiel d'étude.
2. Définir, reconnaître et caractériser des mouvements dans un référentiel d'étude.
3. Définir la quantité de mouvement, connaître et exploiter le principe d'inertie.

Évaluation diagnostique p. 128

SITUATION 1

La notion de référentiel, abordée en classe de Seconde, a montré que son choix est capital pour l'étude du mouvement, car la vitesse et la trajectoire dépendent du référentiel d'étude. Ici, la vitesse du dragster est modifiée dans le référentiel route, qui est référentiel terrestre. Le mouvement du véhicule est rectiligne ralenti puisque la vitesse va diminuer et que l'on suppose que la trajectoire est en ligne droite.

Cette notion de référentiel est introduite dans l'**activité 1** puis nous abordons dans l'**activité 3** ce qu'est un référentiel galiléen afin de pouvoir travailler sur les lois de Newton.

SITUATION 2

Le vecteur vitesse est constant si sa valeur, son sens et sa direction ne varient pas. Dans le cas d'un mouvement circulaire uniforme, seule la valeur de la vitesse est constante, le vecteur vitesse lui ne l'est pas.

Le vecteur vitesse est utilisé dans l'**activité 2** afin de rappeler quelques types de mouvement et de montrer le lien entre les grandeurs vectorielles vitesse et accé-

lération. L'**activité 4** montre l'influence de la masse, ou inertie, sur le mouvement et sur le vecteur vitesse d'un point, et permet d'introduire la grandeur vectorielle quantité de mouvement.

SITUATION 3

En l'absence de frottements, puisque dans le vide, cette sonde se déplace à cette vitesse sans l'action de ses moteurs. Ceux-ci ne sont utilisés que pour modifier très sensiblement sa trajectoire au voisinage d'une planète. On retrouve ici le principe d'inertie, qui est utilisé dans les **activités 3** et **4** pour définir le référentiel galiléen et introduire la quantité de mouvement.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

Le bon référentiel

p. 130

1. C'est un solide par rapport auquel on étudie le mouvement.

2. a. La personne qui se déplace dans l'avion.

b. Sa vitesse est modifiée, puisque selon le référentiel elle vaut $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$; $905 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ou $30 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

c. Le premier référentiel est le sol de l'avion, le deuxième le sol terrestre (référentiel terrestre), le troisième est un référentiel lié à la surface du Soleil, il est plus juste de parler en fait de référentiel héliocentrique que de référentiel « solaire » car le référentiel qui sert à l'étude de tels mouvements est lié au centre du Soleil et pas à sa surface.

3. a. Elle est de $900 \pm 5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, tout dépend du sens dans lequel la personne se déplace avec sa tasse de thé dans l'avion.

b. Le périmètre de l'orbite terrestre est :

$$2\pi R = 2\pi \times 150 \times 10^6 = 9,42 \times 10^8 \text{ km.}$$

Il correspond à la distance parcourue en un an, soit : $3,15 \times 10^7 \text{ s.}$

La vitesse est donc $v = 9,42 \times 10^8 / (3,15 \times 10^7) \approx 30 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

4. a. Une balle que l'on fait rebondir dans l'avion.

b. Le référentiel avion et le référentiel terrestre.

5. La trajectoire de la balle est modifiée.

6. Trajectoire et vitesse, qui caractérisent le mouvement, sont différentes d'un référentiel à l'autre. Il faut donc toujours préciser quel est le référentiel d'étude.

ACTIVITÉ 2

Looping et accélération

p. 131

1. a. et b. Pour obtenir la trajectoire, il faut relier les points. Les points 0 à 10 sont alignés, la trajectoire est rectiligne. Des points 11 à 20, la trajectoire s'incurve, elle est curviligne. Elle se termine des points 21 à 29 par une portion de cercle, elle est alors circulaire.

2. a. Le vecteur vitesse est dans le sens du mouvement et il a pour direction la tangente à la trajectoire.

b. Des points 0 à 6, le vecteur vitesse augmente, le mouvement est rectiligne accéléré. Jusqu'au point 10, ce vecteur est constant, le mouvement est rectiligne uniforme. Des points 11 à 20, le vecteur vitesse augmente, le mouvement est curviligne accéléré. Il va ensuite diminuer petit à petit, le mouvement devient circulaire ralenti. Des points 22 à 25, la vitesse semble constante, le mouvement est alors circulaire uniforme.

3. a. Le vecteur accélération diminue en grandeur jusqu'au point 4, il est sur la trajectoire et dans le sens du mouvement. Il devient nul par la suite.

b. Le vecteur accélération augmente jusqu'à la position 18. Il diminue ensuite, tout en restant toujours orienté vers l'intérieur de la trajectoire.

L'angle formé entre les deux vecteurs est inférieur à 90° quand le mobile accélère, il devient égal à 90° si l'accélération est constante et est supérieur à 90° quand le système ralentit.

4. Les deux vecteurs vitesse et accélération permettent par leur caractéristiques de décrire un mouvement. S'ils sont colinéaires, la trajectoire est rectiligne, le sens du vecteur accélération par rapport au vecteur vitesse permet de savoir si le mouvement est accéléré ou ralenti. Si le vecteur accélération est nul, le mouvement est rectiligne uniforme. Si les deux vecteurs ne sont pas colinéaires, le mouvement est curviligne (ou circulaire). L'angle alors formé entre les deux vecteurs permet de savoir si le mouvement est accéléré, uniforme ou ralenti.

ACTIVITÉ 3

Référentiel et principe d'inertie

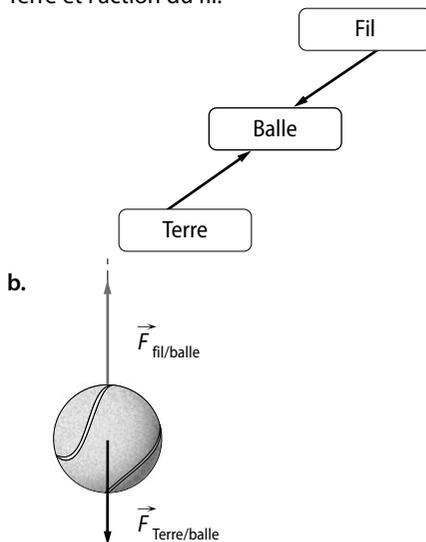
p. 132

1. La balle suspendue.

2. a. Dans un référentiel lié à la voiture. On l'appellera le référentiel voiture.

b. Par rapport à la route par exemple. C'est le référentiel terrestre.

3. a. À l'aide du diagramme objets-actions, les actions mécaniques s'exerçant sur la balle sont l'action de la Terre et l'action du fil.

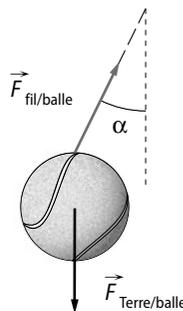


b.

4. Dans le référentiel voiture, la balle est immobile ; dans le référentiel terrestre, elle est animée d'un mouvement rectiligne uniforme. Le principe d'inertie est donc vérifié dans ces deux référentiels, les actions mécaniques qui s'exercent sur la balle se compensent.

5. Dans le référentiel voiture.

6. Les actions mécaniques sont les mêmes, mais comme le fil est incliné, le schéma des forces est le suivant :



7. Non puisque les actions mécaniques ne se compensent pas même si la balle est au repos.

8. a. La vitesse augmente de $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ soit $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ en 10 secondes. La variation de vitesse est :

$$\Delta v / \Delta t = 25 / 10 = 2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

Cette grandeur est l'accélération, le mouvement est rectiligne uniformément accéléré puisque l'accélération est constante pendant les 10 secondes.

b. Si le conducteur prend un virage à droite, la balle ira à gauche.

Le mouvement de la voiture est circulaire uniforme car à vitesse (en valeur) constante.

Comme précédemment, le principe d'inertie ne peut être appliqué ici, même si la balle est au repos dans le référentiel voiture, les actions mécaniques qui s'exercent sur elle ne se compensent pas.

9. Dans notre exemple, la voiture, si elle tourne ou accélère par rapport au référentiel terrestre, ne peut être utilisée comme référentiel pour appliquer le principe d'inertie. En généralisant, on ne peut utiliser le principe d'inertie dans un référentiel qui tourne, ralentit ou accélère par rapport à un référentiel où le principe d'inertie peut être appliqué.

ACTIVITÉ 4

Mouvement, masse et vitesse

p. 133

1. On commence les pesées par la balance de plus grande portée pour connaître l'ordre de grandeur des masses à peser. On choisit ensuite la balance qui donnera la mesure la plus précise. Les masses s'expriment $m \pm \Delta m$.

2. a. Les mobiles sont animés d'un mouvement rectiligne uniforme.

b. On peut appliquer le principe d'inertie aux mobiles dans le référentiel terrestre. Le mouvement étant rectiligne uniforme, les actions mécaniques qui s'exercent sur eux se compensent, ces deux systèmes sont pseudo-isolés.

3. Si m_1 augmente, la vitesse v_2 augmente.

4. Les vecteurs vitesse sont sur la trajectoire et dans le sens du mouvement mais leurs valeurs sont différentes.

5. Les vecteurs quantité de mouvement sont presque identiques.

6. La vitesse du palet va augmenter si la masse de la crosse augmente.

7. a. Avant et après le choc, le vecteur quantité de mouvement du système {crosse + palet} reste le même.

b. Le vecteur quantité de mouvement d'un système au repos ou animé d'un mouvement rectiligne uniforme est constant, soit $\vec{p} = \text{constante}$.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : Choisir un référentiel d'étude

1 1. c.

2. b et c.

3. a et d.

2 1. Le mobile est soumis à l'action de la Terre et à l'action de la table sans frottement. Ces actions se compensent.

2. L'enregistrement 1, car le centre d'inertie du mobile est animé d'un mouvement rectiligne uniforme.

3. Le référentiel terrestre.

3 1. Il est immobile.

2. Il est circulaire uniforme. Il tourne dans le même sens et à la même vitesse que la Terre.

4 1. Quand sa vitesse est stable.

2. Dans la même phase du mouvement.

5 1. Dans le référentiel terrestre.

2. Son mouvement est approximativement circulaire uniforme.

3. a. Il verrait la Terre tourner sur elle-même.

b. Par analogie avec le référentiel terrestre, ce référentiel est dit « lunaire ».

c. Il serait lié au centre de la Lune.

d. Il tournerait sur une durée égale à celle de la période de rotation de la Lune sur elle-même.

e. Oui, car la durée du mouvement est inférieure à sa période de révolution.

6 L'analemme

En prenant chaque semaine exactement à la même heure et au même endroit la photo du Soleil pendant une année, on obtient ce cliché.

La trajectoire laissée par le Soleil au cours d'une année est appelée une analemme. Le déplacement apparent du Soleil est causé par le mouvement de la Terre autour du Soleil combinée avec l'inclinaison de l'axe de la Terre.

1. Quel est le référentiel d'étude choisi ici ?

Le référentiel terrestre.

2. Quand le Soleil apparaît-il au point le plus haut de l'analemme ?

Le Soleil est en haut de l'analemme en été.

3. Quel jour de l'année est-il lorsque le Soleil est au point le plus bas de l'analemme ?

Il est dans la position la plus basse le jour du solstice d'hiver.

COMPÉTENCE 2 : Définir, reconnaître et caractériser des mouvements dans un référentiel d'étude

7 1. b, c et d.

2. b et d.

3. b.

4. b, c et d.

8 1. Un repère d'espace orthonormé $(O ; x, y)$ et un repère de temps.

2. Son vecteur position.

9 1. Elle augmente.

2. Il est rectiligne accéléré.

10 1. a. À $t = 0$ s, $x(0) = 3 \times 0 + 5 = 5$ m.

b. À $t = 3$ s, $x(3) = 3 \times 3 + 5 = 14$ m.

2. On peut calculer la vitesse moyenne entre $t = 3$ s et $t = 0$ s, on trouve $v = 9/3 = 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; ou poser l'expression du nombre dérivé $v = dx/dt = 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. Le mouvement est rectiligne puisque sur un axe et uniforme car la vitesse est constante.

12 1. Les représentations **a** et **d** sont correctes. En **b**, le vecteur vitesse n'est pas dans le sens du mouvement. En **c**, le vecteur vitesse n'est pas sur la tangente à la trajectoire et le vecteur accélération n'est pas vers l'intérieur de la courbe.

2. Le mouvement **a** est rectiligne ralenti, car les deux vecteurs sont de sens opposés. En **d**, le mouvement est circulaire accéléré puisque l'angle entre les deux vecteurs est inférieur à 90° , le produit $\vec{v} \cdot \vec{a}$ est supérieur à 0.

COMPÉTENCE 3 : Définir la quantité de mouvement, connaître et exploiter le principe d'inertie

13 1. Faux. Le vecteur peut changer de sens et/ou de direction.

2. Vrai. Car $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$.

3. Faux. Ces deux grandeurs ne s'expriment pas dans la même unité.

4. Faux. Le système a la même masse avant et après le saut. La vitesse devrait rester constante puisque le système est pseudo-isolé (en réalité, elle diminue à cause des frottements sur le sol).

5. Faux. Elle est soumise à des actions mécaniques gravitationnelles qui ne se compensent pas.

14 1. $p = 950 \times 13,9 = 1,32 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

2. $p = 1,67 \times 10^{-27} \times 3,00 \times 10^8 = 5,01 \times 10^{-19} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. $p = 20 \times 1,0 = 20 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

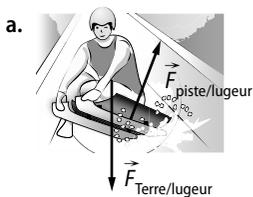
4. $p = 73 \times 10^3 \times 50 = 3,7 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Le classement est : 2, 3, 1 et 4.

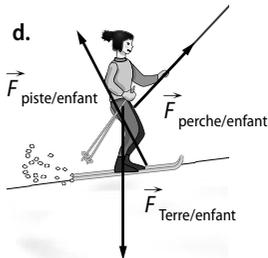
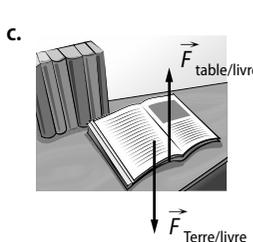
15 La quantité de mouvement

Un canon tire un obus de 35,0 kg vers une cible. Cet obus se déplace avec une vitesse de $180 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Calculer la quantité de mouvement de l'obus exprimée dans une unité correcte.
 $p = m \cdot v = 35,0 \times (180/3,6) = 1,75 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

17 1. et 2.



b. Aucune action mécanique si l'astéroïde est loin de tout astre.



3. Le système **b** est isolé puisqu'il n'est soumis à aucune action mécanique. Le système **c** est pseudo-isolé car les actions mécaniques se compensent puisqu'il est au repos. Le système **d** est pseudo-isolé car son mouvement est rectiligne uniforme, donc d'après le principe d'inertie les actions mécaniques se compensent. Le système **a** n'est ni isolé ni pseudo-isolé car il freine et les actions mécaniques ne se compensent pas.

4. Pour le système **c** qui est au repos, sa vitesse est nulle.

18 1. Tout objet persévère dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme si les actions mécaniques qui s'exercent sur lui se compensent ou s'il n'est soumis à aucune action mécanique.

2. Pour le premier enregistrement.

3. La table est horizontale pour l'enregistrement 1, les deux actions mécaniques qui s'exercent sur le mobile se compensent. La table est inclinée pour l'enregistrement 2, les forces ne se compensent pas et la vitesse augmente.

4. Il est constant pour l'enregistrement 1, il augmente en valeur pour le 2. Dans les deux cas, sa direction est la trajectoire et son sens celui du mouvement.

19 1. L'action exercée par la Terre et l'action exercée par la piste sur le skieur.

2. Oui car les deux actions semblent se compenser. Dans ce cas par contre, cette représentation est incorrecte car la vitesse du skieur augmente, son mouvement n'est pas rectiligne uniforme.

3. L'action exercée par la piste sur le skieur est inclinée vers la droite.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

20 1. Le référentiel terrestre.

- Rectiligne accéléré.
- Rectiligne ralenti.
- Circulaire accéléré.
- Circulaire uniforme.

21 1. En mètre par seconde, la vitesse varie de 0 à $27,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. L'accélération est $a = 27,8/3,7 = 7,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

2. Ils ont même sens : celui du mouvement, et même direction : la trajectoire.

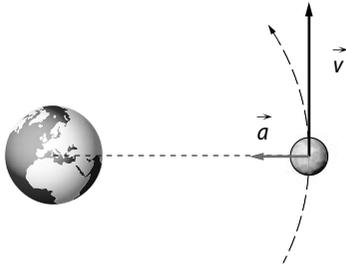
3. Non, car son mouvement est rectiligne uniformément accéléré par rapport au référentiel terrestre.

22 **a** correspond à **2** ; **b** correspond à **3** ; **c** correspond à **4** ; **d** correspond à **1**.

23 1. Dans le référentiel géocentrique.

2. $v = \pi d / \text{durée d'un tour}$
 $= \pi \times 2 \times 3,84 \times 10^8 / (27,3 \times 24 \times 3\,600)$
 $= 1,02 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. et 4. Avec comme échelle : 1 cm pour $500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



- Non car son mouvement est circulaire uniforme.
- Elle se déplacerait selon un mouvement rectiligne uniforme dans l'espace et quitterait l'orbite terrestre.

24 1. a. La première équation permet d'écrire $t = \frac{x}{2}$, en

substituant cette expression dans $y(t)$ on obtient $y(x) = 4 \frac{x}{2} + 2 = 2x + 2$. C'est l'équation de la trajectoire.

b. L'équation $y = 2x + 2$ est celle d'une fonction affine. La trajectoire est donc rectiligne.

2. a. $v_x = \frac{dx}{dt} = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $v_y = \frac{dy}{dt} = 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Le vecteur vitesse s'écrit dans le repère : $\vec{v} = 2\vec{i} + 4\vec{j}$.

Il est constant au cours du temps puisque ces coordonnées ne varient pas en fonction de t .

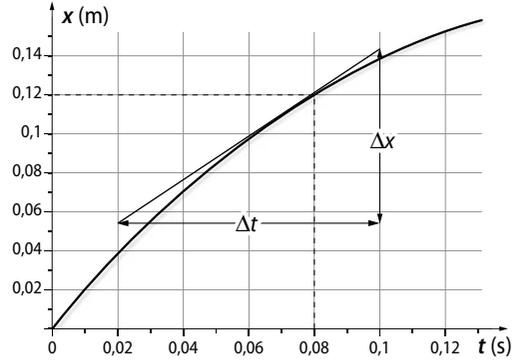
b. $v = \sqrt{2^2 + 4^2} \approx 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Le mouvement est donc rectiligne uniforme.

3. a. Le vecteur quantité de mouvement est $\vec{p} = m \cdot \vec{v} = 0,2\vec{i} + 0,4\vec{j}$; il est également constant.

b. Si le référentiel d'étude choisi est galiléen, puisque \vec{p} est un vecteur constant, le point matériel est considéré comme isolé ou pseudo-isolé.

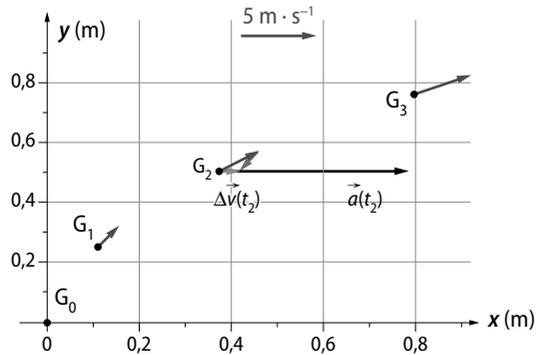
25 1. Il faut tracer la tangente au point considéré et calculer sa pente :

$$v = \Delta x / \Delta t = 0,085 / 0,08 = 1,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$



2. Si on trace la tangente à $t = 0,02 \text{ s}$ et à $t = 0,1 \text{ s}$, on constate que sa pente diminue, la vitesse va elle aussi diminuer.

26 1. a.



b. Le vecteur variation de vitesse a pour valeur $2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

2. a. $\Delta t = 0,250 \text{ s}$, l'accélération est $a(t_2) = \Delta v / \Delta t = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

b. Le vecteur est tracé sur la figure à l'échelle 1 cm pour $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

27 1. Car elles sont paramétrées par le temps.

2. À $t = 0$, $x(0) = 0$ et $y(0) = 0$.

3. a. $v_x(t) = \frac{dx(t)}{dt} = 8,00t + 6,00$

et $v_y(t) = \frac{dy(t)}{dt} = 3,00$.

b. À $t = 1,00 \text{ s}$, $v_x(1,00) = 8,00 \times 1,00 + 6,00 = 14,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $v_y(1,00) = 3,00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

$$v = \sqrt{v_x(t)^2 + v_y(t)^2} = 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$4. a_x(t) = \frac{dv_x(t)}{dt} = 8,00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\text{et } a_y(t) = \frac{dv_y(t)}{dt} = 0.$$

La valeur de l'accélération est $a = 8,00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

28 1. $v(3) = 8,75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $v(4) = 7,80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
et $v(5) = 6,88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

2. On peut choisir comme échelle 1 cm pour $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. On trace le vecteur $\Delta \vec{v}(4) = \vec{v}(5) - \vec{v}(3)$ que l'on mesure, pour déterminer grâce à l'échelle sa norme qui vaut $1,87 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

L'accélération est alors $a(4) = \Delta v(4)/2\tau = 23,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. On prend comme échelle 1 cm pour $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ par exemple.

4. Le produit est négatif, le mouvement est rectiligne ralenti.

29 1. Trajectoire curviligne (parabolique).

2. Au point G_2 .

3. Il est constant.

4. a. Autour de G_{10} , car les vecteurs vitesse et accélération sont perpendiculaires : $\vec{a} \cdot \vec{v} = 0$.

b. Avant G_{10} le mouvement est uniformément ralenti, après il est uniformément accéléré.

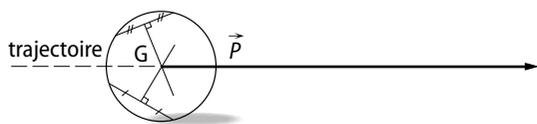
30 L'intersection de deux médiatrices d'une corde du cercle passe par G. La direction et le sens de \vec{p} sont ceux du mouvement (flèche trajectoire).

La valeur de la quantité de mouvement est :

$$p = m \cdot v = 0,127 \times 3,94 = 5,00 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

On choisit comme échelle : 1 cm pour $1 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Le vecteur mesure alors 5 cm .



31 1. Le référentiel terrestre, considéré comme galiléen car le mouvement est de courte durée.

2. Avant le choc, c'est la bille 2 qui a la plus grande vitesse car $p_1 < 2p_2$, soit :

$$2m_2 \cdot v_1 < 2m_2 \cdot v_2 \Rightarrow v_1 < v_2.$$

Après le choc, c'est l'inverse.

3. a. $\vec{p}_1 > \vec{p}'_1$; $\vec{p}_2 < \vec{p}'_2$; $\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2$ après construction graphique.

b. Seul le système {bille 1 + bille 2} est pseudo-isolé puisque le vecteur quantité de mouvement se conserve.

32 1. Le référentiel terrestre, considéré comme galiléen car le mouvement est de courte durée.

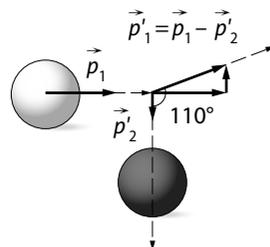
2. Le système formé par la boule blanche incidente et la boule rouge.

3. $p_1 = 0,209 \times 0,50 = 0,10 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; $p_2 = 0 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;
 $p'_2 = 0,209 \times 0,20 = 0,042 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

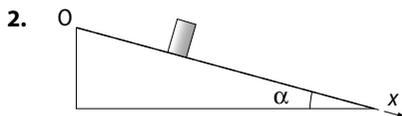
Pour ce système, la somme des vecteurs quantité de mouvement avant et après le choc doit être la même. Soit $\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2$ avec $\vec{p}_2 = \vec{0}$ puisque la boule rouge est au repos.

À l'échelle 1 cm pour $0,040 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, on obtient la représentation graphique de $\vec{p}'_1 = \vec{p}_1 - \vec{p}'_2$.

En mesurant \vec{p}'_1 on obtient $p'_1 = 0,10 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. La vitesse de la boule blanche est donc $v'_1 = p'_1/m = 0,50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



33 1. Dans le référentiel terrestre.



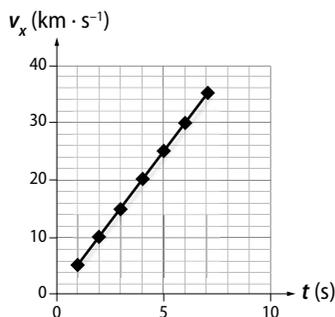
3. a. et b.

La formule est « $=(D2-B2)/(D1-B1)$ »

c. La formule est « $=(E3-C3)/(E1-C1)$ »

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1 t (s)	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	
2 x (m)	0,000	2,500	10,00	22,50	40,00	62,50	90,00	122,5	160,0	
3 vx (m.s ⁻¹)			5,000	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	
4 ax (m.s ⁻²)				5,000	5,000	5,000	5,000	5,000		

4. a. et b. C'est une fonction linéaire, d'équation $v_x = 5,0t$. La pente correspond à l'accélération. Ce mouvement peut être décrit par l'équation $v_x = a \cdot t$.



34 1. Le référentiel terrestre.

2. L'instant où le conducteur décide de freiner est pris comme origine du temps $t = 0$. Le point correspondant est l'origine du repère d'espace. On choisit un seul axe (Ox) pour étudier ce mouvement.

3. a. Pour calculer cette valeur, on utilise les deux valeurs de vitesse données que l'on convertit en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ pour une durée de 2,8 s :

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\text{vitesse finale} - \text{vitesse initiale}}{2,8}$$
$$= \frac{0 - 14}{2,8} = -5,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

b. Cette coordonnée de l'accélération sur l'axe (Ox) est négative, le vecteur accélération est donc opposé au sens du mouvement et à celui de la vitesse.

c. Le produit scalaire des deux vecteurs est négatif, le mouvement est ralenti.

4. a. Comme $a(t) = \frac{dv(t)}{dt}$, par intégration on obtient $v(t) = -5,0 t + \text{constante}$. Cette constante d'intégration est déterminée à l'origine, c'est-à-dire à $t = 0$. On a $v(0) = \text{constante} = 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. L'expression est donc $v(t) = -5,0 t + 14$. On fait de même pour $x(t)$;

$x(t) = -1/2 \times 5,0 t^2 + 14 t + \text{constante}$. Cette constante est égale à $x(0) = 0$, et donc $x(t) = -1/2 \times 5,0 t^2 + 14 t$.

b. Calculons l'instant t correspondant à cette vitesse $v = 35/3,6 = 9,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $t = \frac{9,7 - 14}{-5,0} = 0,84 \text{ s}$.

En reportant cette valeur dans l'expression $x(t)$, on a $x(0,84) = 9,9 \text{ m}$. Quand la vitesse est de $35 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, la distance n'est pas de 20 m mais de 9,9 m.

5. a. À la vitesse de $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, cette distance est :
 $d = 14/1 = 14 \text{ m}$.

b. La distance de freinage est donc de $26 - 14 = 12 \text{ m}$, et la durée de freinage est $\Delta t = 1,8 \text{ s}$.

c. La coordonnée de l'accélération est :

$$a' = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{0 - 14}{1,8} = -7,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

d. $v'(t) = -7,7 t + 14$

et $x'(t) = -1/2 \times 7,7 t^2 + 14 t + 14$.

e. Calculons l'instant t' où $v' = 9,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$:

$$t' = \frac{9,7 - 14}{-7,7} = 0,54 \text{ s}.$$

La valeur de x' est 20 m.

Champ de force et mouvement

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
– Deuxième loi de Newton : $\sum \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$.	– Connaître et exploiter les trois lois de Newton ; les mettre en œuvre pour étudier des mouvements dans des champs de pesanteur et électrostatique uniformes. – Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour étudier un mouvement.

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Connaître et exploiter la deuxième loi de Newton.
2. Étudier un mouvement dans un champ de pesanteur.
3. Étudier un mouvement dans un champ électrostatique.

Évaluation diagnostique

p. 146

SITUATION 1

Il s'agit de la représentation **b**. Il est nécessaire de connaître la résultante, c'est-à-dire la somme vectorielle des forces qui agissent sur un système afin d'appliquer la première ou la deuxième loi de Newton. L'**activité 1** permet de montrer le lien existant entre cette résultante des forces et la variation du vecteur quantité de mouvement d'un système en introduisant l'aspect vectoriel de la deuxième loi de Newton.

SITUATION 2

Les particules chargées sont accélérées à l'aide d'un champ électrostatique uniforme, créé à l'aide de deux armatures ou électrodes soumises à une tension électrique. Les accélérateurs électrostatiques sont linéaires, il est possible, en associant un champ magnétique, d'obtenir des accélérateurs circulaires qui permettent d'obtenir des particules d'énergie plus élevée.

L'étude du principe de fonctionnement d'un accélérateur linéaire est introduite dans l'**activité 2** où cette technique est utilisée pour déterminer la structure chimique superficielle des objets d'art au musée du Louvre.

SITUATION 3

La vitesse du javelot est bien sûr un des paramètres les plus importants pour réaliser un record de lancer, mais la direction donnée à ce projectile l'est tout autant. Cette direction, donnée par l'angle de tir α , influe sur la distance parcourue par le projectile. Si $\alpha = 45^\circ$, le javelot lancé à une vitesse donnée ira plus loin que s'il est lancé avec un angle de tir différent.

Les caractéristiques des mouvements de projectiles lancés dans le champ de pesanteur terrestre, considéré comme uniforme, sont étudiées dans les **activités 3** et **4**.

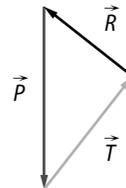
ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

Le téléski

p. 148

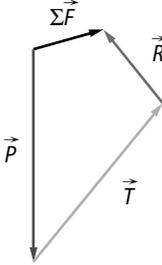
1. Dans un référentiel lié au sol, c'est-à-dire le référentiel terrestre.
2. La force \vec{P} , qui est le poids, modélise l'action de la Terre sur le système, \vec{R} est l'action de la piste avec frottements et \vec{T} celle de la perche sur le système.
3. a. La somme vectorielle est :



- b. Elle est égale au vecteur nul : $\sum \vec{F} = \vec{0}$. Les actions mécaniques qui s'exercent sur le système se compensent.
- c. Ce système est donc pseudo-isolé.

d. La première loi de Newton permet d'affirmer que le vecteur quantité de mouvement est constant. Son sens est celui du mouvement et sa direction est celle de la piste (même sens et même direction que le vecteur vitesse \vec{v}), son intensité est $p_1 = m \cdot v$.

4. a. Les forces \vec{R} et \vec{T} sont modifiées.
 b. La résultante des forces $\Sigma\vec{F} = \vec{P} + \vec{T} + \vec{R}$ n'est pas nulle dans ce cas, ce vecteur a la direction de la piste et le sens du mouvement.



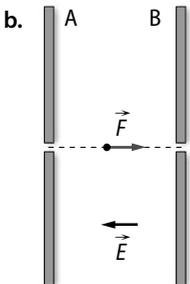
- c. Le système ne peut plus être considéré comme pseudo-isolé, les actions mécaniques s'exerçant sur le système ne se compensent plus.
 d. Le vecteur quantité de mouvement, même s'il conserve le même sens et la même direction, varie en intensité. Le vecteur quantité de mouvement sera plus grand ici puisque la vitesse du système augmente, le vecteur variation de quantité de mouvement $\Delta\vec{p}$ a la direction de la piste et il est dans le sens du mouvement.
 5. Pendant la durée Δt , les vecteurs $\Delta\vec{p}$ et $\Sigma\vec{F}$ sont colinéaires.

ACTIVITÉ 2

Un accélérateur linéaire

p. 149

1. a. Le champ qui est utilisé ici est un champ électrostatique, en revanche le champ de pesanteur est négligé.
 b. Les particules doivent porter une charge électrique q .
 2. a. Ce sont les ions hydrure de formule H^- . L'armature B sera chargée positivement, les ions négatifs sont attirés par la force électrostatique liée au champ \vec{E} vers cette armature.

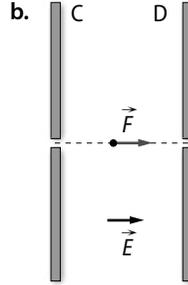


3. a. $E_c = |e| \cdot U_{AB} = 1,6 \times 10^{-19} \times 2 \times 10^6 = 3,2 \times 10^{-13} \text{ J} = 2 \times 10^6 \text{ eV} = 2 \text{ MeV}$.
 b. L'énergie cinétique d'une particule en mouvement est $E_c = 1/2 m \cdot v^2$.

On a donc $v_B^2 = 2 e \cdot U_{AB}/m$ et

$$v_B = \sqrt{\frac{2 e \cdot U_{AB}}{m}} = 2 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

4. a. L'éplucheur enlève des électrons.
 b. L'ion hydrure perd 2 électrons pour devenir un proton H^+ .
 5. a. Cette fois, l'armature positive est l'armature C, les ions hydrogènes positifs sont accélérés par la charge négative de l'armature D.



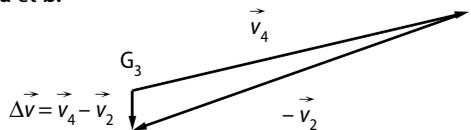
6. a. Les protons arrivent en C à la vitesse v_C , puis, soumis à la tension U_{CD} , ils acquièrent alors l'énergie cinétique E_c qui leur permet d'obtenir en D une vitesse v_D supérieure à v_C .
 b. Si $v_B = v_C$, alors la vitesse en D est supérieure à v_B et donc à v_A .
 7. Les ions sont accélérés entre les armatures des deux condensateurs grâce à un champ électrostatique. Le mouvement est rectiligne, la trajectoire et la vitesse des charges ont la direction du champ électrostatique. Le terme accélérateur électrostatique linéaire ou rectiligne est totalement adapté.

ACTIVITÉ 3

Un record de saut en longueur

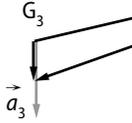
p. 150

1. Le référentiel terrestre que l'on considère comme galiléen car la durée du mouvement est courte.
 2. Elle est constante, la distance est approximativement la même entre deux positions successives de la voiture.
 3. G possède un mouvement curviligne, la courbe formée est une parabole, le mouvement est parabolique.
 4. On mesure l'écart sur le document entre G_3 et G_5 , la distance réelle parcourue par la voiture est déterminée grâce à l'échelle fournie par la longueur de la voiture. On trouve une valeur de la vitesse $v = 38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Vitesse légèrement inférieure à celle indiquée par les commissaires le jour du saut.
 5. a et b.



c. On mesure le vecteur $\vec{\Delta v}$ et grâce à l'échelle de la vitesse on détermine sa valeur. On trouve $\Delta v = 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. La valeur de l'accélération est :
 $a = \Delta v / (2 \Delta t) = 4 / (2 \times 0,2) = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Après avoir tracé \vec{a} qui a même sens et même direction que $\vec{\Delta v}$, on constate que \vec{a} et \vec{g}_0 ont même sens, même direction et même intensité, on peut écrire :
 $\vec{a} = \vec{g}_0$.



d. Dans le repère choisi, $a_x = 0$ et $a_z = -g_0$.

6. a. $v_{0x} = v_0 \cdot \cos \alpha$
 $v_{0z} = v_0 \cdot \sin \alpha$

b. et c. On trouve par intégration des coordonnées de l'accélération :

$v_x(t) = v_0 \cdot \cos \alpha$ $x(t) = (v_0 \cdot \cos \alpha) \cdot t$
 $v_z(t) = -g_0 \cdot t + v_0 \cdot \sin \alpha$
 $z(t) = -1/2 g_0 \cdot t^2 + (v_0 \cdot \sin \alpha) \cdot t$.

7. $t = x / (v_0 \cdot \cos \alpha)$.

Reportons t dans l'expression $z(t)$:

$-1/2 g_0 \cdot (x / (v_0 \cdot \cos \alpha))^2 + (v_0 \cdot \sin \alpha) \cdot (x / (v_0 \cdot \cos \alpha))$.

En simplifiant, on obtient :

$$z(x) = -\frac{1}{2} g_0 \cdot \left(\frac{x}{v_0 \cdot \cos \alpha} \right)^2 + x \cdot \tan \alpha.$$

8. Si l'on veut modifier la distance parcourue, qui se nomme la portée, on pose $z(x) = 0$ qui correspond à une équation du second degré en x , dont les solutions seront zéro (le point de départ) et la portée. Cette portée dépend de deux paramètres qui sont α et v_0 . Elle est maximale si $\alpha = 45^\circ$ et elle augmente avec la vitesse initiale.

Pour battre ce record, il faut soit aller plus vite (ce qui est réalisable en modifiant la piste d'accélération), soit augmenter α , mais il faut alors tenir compte d'autres forces comme celle créée par l'air qui pourrait faire retourner la voiture pendant le saut.

ACTIVITÉ 4

Mouvement d'un projectile

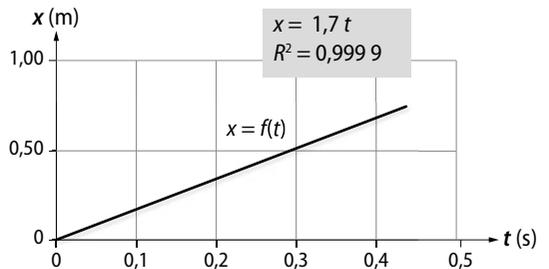
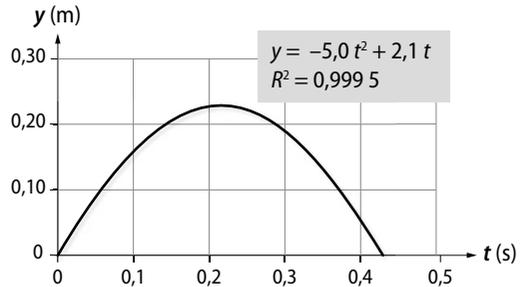
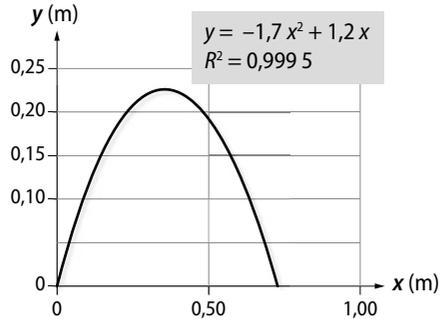
p. 151

1. L'objectif de la webcam doit être perpendiculaire au plan du mouvement pour éviter toute déformation de l'image (erreur de parallaxe), et pour cadrer correctement le mouvement.

2. Il est nécessaire d'adapter la taille de l'image pour effectuer un pointage plus précis, puis d'étalonner l'écran à l'aide de la toise, de choisir le repère d'espace et l'origine des temps. Généralement, on associe à la première image étudiée l'origine des temps et l'origine du repère d'espace.

3. Le logiciel mesure pour chaque image les coordonnées du point dans le repère choisi, ici $x(t)$ et $y(t)$. Il indique donc également le temps t .

4. a. et b. À l'aide du tableur-grapheur utilisé, le coefficient de détermination affiché sous l'équation proposée est très proche de 1, le modèle retenu est adapté au mouvement réel.



5. $x(t) = 1,7 t$ et $y(t) = -5,0 t^2 + 2,1 t$.

6. a. $v_x = 1,7$ et $v_y = -10 t + 2,1$.

b. Pour les cellules suivantes, on peut proposer la formule suivante en D2 :

	A	B	C	D
1	t (s)	x (m)	y (m)	$v_y(t)$
2	0	0,00	0,00	$= -10 * A2 + 2,1$

c. À $t = 0$, on a $v_x(0) = 1,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $v_y(0) = 2,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

d. $v_0 = \sqrt{1,7^2 + 2,1^2} = 2,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $\frac{v_0 \cdot \sin \alpha}{v_0 \cdot \cos \alpha} = \tan \alpha = 1,2$ soit $\alpha = \tan^{-1}(1,2) = 51^\circ$.

7. a. $a_x = 0$ et $a_y = -10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

b. $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Cette valeur est très proche de g_0 , l'écart relatif entre ces deux valeurs est :

$$\frac{|g_0 - a|}{g_0} \times 100 = 2 \%$$

8. a. La trajectoire obtenue est une parabole, la chute peut être considérée comme libre, le projectile n'est soumis qu'au champ de pesanteur local g_0 .

b. Il s'agit de l'action mécanique exercée par la Terre sur le projectile, qui est modélisée par son poids \vec{P} .

9. On a une accélération verticale, dirigée vers le bas, tout comme \vec{g}_0 , puisque $a_x = 0$ et $a_y = -10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

De plus, $a \approx g_0$, on peut donc affirmer que $\vec{a} = \vec{g}_0$.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : Connaître et exploiter la deuxième loi de Newton

1. 1. b.

2. a.

3. b et d.

4. a.

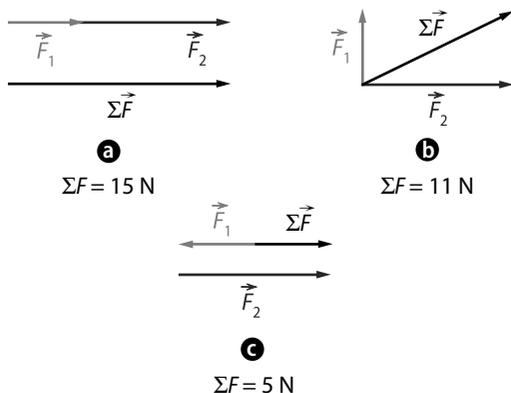


La somme vectorielle est nulle en **a**, pas en **b**.

2. Dans la situation **b**.

4 La résultante des forces

Tracer la résultante des forces sur les schémas suivants et déterminer son intensité.



5. La deuxième loi de Newton nous permet d'écrire $m \cdot a = F$ avec F la force motrice du moteur.

On calcule $F = 2,5 \times 10^3 \times 1,5 = 3,8 \times 10^3 \text{ N}$.

Si la masse du camion devient égale à 3,5 tonnes soit $3,5 \times 10^3 \text{ kg}$, l'accélération a pour valeur :

$$a = 3,8 \times 10^3 / (3,5 \times 10^3) = 1,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

6. 1. Le référentiel terrestre.

2. a. $\Delta p = m \cdot \Delta v = 200 \times (10 - 0) = 2\,000 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

b. Le vecteur a a la direction de la route et son sens est opposé à celui du mouvement puisque la vitesse diminue.

c. La deuxième loi de Newton puisque la quantité de mouvement varie.

d. Ce sont les mêmes que ceux de $\Delta \vec{p}$.

e. $\Sigma F = \Delta p / \Delta t = 1\,000 \text{ N}$.

COMPÉTENCE 2 : Étudier un mouvement dans un champ de pesanteur

7. 1. d.

2. a et b.

3. c.

4. b.

8. a. Pour $\alpha = 0$, le mouvement est parabolique, le sommet de la parabole est en O.

b. La trajectoire est verticale, le mouvement est rectiligne uniformément varié.

c. Le mouvement est rectiligne uniformément accéléré.

9. 1. La deuxième loi de Newton donne $\vec{a} = \vec{g}_0$.

2. Dans le repère choisi, la relation précédente donne $a_z = g_0$. Par intégrations successives et en déterminant les constantes d'intégration à l'aide des conditions initiales, on obtient :

$$v_z(t) = g_0 \cdot t \text{ puis } z(t) = 1/2 g_0 \cdot t^2$$

3. Pour $z(t) = h$, on obtient $t = \sqrt{\frac{2h}{g_0}} = 0,45 \text{ s}$.

4. À $t = 0,45 \text{ s}$, $v_z(0,45) = 4,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

10. 1. On a toujours $a_z = g_0$, mais $v_z(t) = g_0 \cdot t - v_0$, l'expression de $z(t)$ devient $z(t) = 1/2 g_0 \cdot t^2 - v_0 \cdot t$.

2. La hauteur est maximale quand $v_z(t) = 0$, soit $t = v_0/g_0$. En reportant cette expression dans $z(t)$, on obtient $z(t) = 1/2 v_0^2/g_0 - v_0^2 \cdot g_0 = -1/2 v_0^2/g_0$.

La valeur est $z = -0,46 \text{ m}$, dans le repère choisi, soit une hauteur maximale $H = 1,5 \text{ m}$ au-dessus du niveau du sol.

11. 1. $y(x) = -\frac{1}{2} g_0 \cdot \left(\frac{x}{v_0 \cdot \cos \alpha} \right)^2 + x \cdot \tan \alpha$.

2. Pour $y = 0$, $x = 72,28 \text{ m}$ dans le cas de ce lancer. En reportant ces valeurs dans l'équation de la trajectoire, on obtient $v_0 = 26,63 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. On cherche cette fois x pour $y = 0$. On remplace dans l'équation de la trajectoire g_0 par g_{05} et on donne à v_0 la valeur trouvée en 2.

On obtient l'équation $-0,016x^2 + x = 0$ qui admet deux solutions, $x = 0$ (le point de départ) et $x = 61,67$ m qui est la distance parcourue par le javelot sur Saturne.

12 1. $g_{0s} = G \frac{M_s}{R_s^2}$.

2. $g_{0s} = 6,67 \times 10^{-11} \times \frac{1,99 \times 10^{30}}{(6,96 \times 10^8)^2} = 274 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

G est en $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, R_s en m et M_s en kg, l'expression

$G \frac{M_s}{R_s^2}$ s'exprime en $\frac{\text{m}^3 \cdot \text{kg}}{\text{kg} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^2} = \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.

3. $\frac{g_{0s}}{g_0} = 27,9$.

4. Sur Terre :

$$y(x) = -\frac{1}{2} g_0 \cdot \left(\frac{x}{v_0 \cdot \cos \alpha} \right)^2 + x \cdot \tan \alpha$$

$$= -0,010 x^2 + 0,58 x.$$

Sur le Soleil :

$$y(x) = -\frac{1}{2} \times 27,9 \times g_0 \cdot \left(\frac{x}{v_0 \cdot \cos \alpha} \right)^2 + x \cdot \tan \alpha$$

$$= -0,29 x^2 + 0,58 x.$$

5. Le calcul de la portée s'effectue en posant $y(x) = 0$. On obtient sur Terre l'équation $x(0,58 - 0,010 x) = 0$ qui admet deux solutions, $x = 0$ (l'origine), et $x = 58$ m qui est la portée. Sur le Soleil, l'équation est $x(0,58 - 0,29 x) = 0$, des deux solutions la portée est $x = 2,1$ m. On retrouve le rapport de 27,9 entre ces deux valeurs. La portée est plus faible sur le Soleil, la valeur du champ de pesanteur influe sur le mouvement de projectiles lancés dans les mêmes conditions.

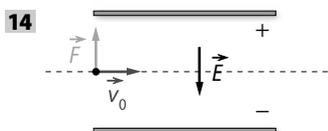
COMPÉTENCE 3 : Étudier un mouvement dans un champ électrostatique

13 1. Faux. Le champ est vectoriel, il faut que le sens et la direction du vecteur restent constants.

2. Vrai.

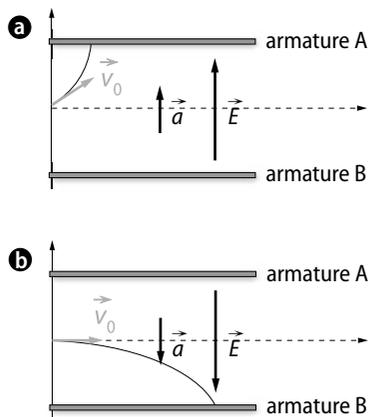
3. Faux. Ces deux vecteurs sont colinéaires.

4. Faux. La masse apparaît dans l'équation de la trajectoire.



- 2. a.** La force est verticale, orientée vers le haut.
- b.** Puisque la charge de l'électron est négative, le champ vertical est orienté vers le bas.
- c.** Le champ est orienté de l'armature chargée positivement vers l'armature chargée négativement.

15 1. et 2.



16 1. $F = | -e | \cdot E = 1,6 \times 10^{-17} \text{ N}$.

2. $P = m \cdot g_0 = 8,9 \times 10^{-30} \text{ N}$.

3. $F = 1,8 \times 10^{12} \times P$, on peut dans ce cas négliger le poids par rapport à la force électrostatique.

17 1. a. La force électrostatique a même sens et même direction que \vec{E} , son intensité est $F = e \cdot E$.

b. $\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$ soit $m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = m \cdot \vec{a} = e \cdot \vec{E}$.

En projetant cette relation sur l'axe (Ox), on a $a_x = e \cdot E/m$.

2. a. Les vecteurs \vec{a} et \vec{v} ont même sens et même direction, avec \vec{a} vecteur constant. Le mouvement est rectiligne uniformément accéléré.

b. Le proton est accéléré uniformément sur une trajectoire rectiligne, le dispositif est donc bien un accélérateur rectiligne ou linéaire.

3. $v(t) = a_x \cdot t + \text{constante} = (e \cdot E/m) \cdot t + v_0$
 et $x(t) = 1/2 (e \cdot E/m) \cdot t^2 + v_0 \cdot t$.

4. a. $v_x(t) = v_f = 2 v_0 = (e \cdot E/m) \cdot t + v_0$
 soit $t = (m \cdot v_0)/(e \cdot E) = 2,1 \times 10^{-8} \text{ s}$.

b. Pour cette valeur de t , on trouve :
 $x(2,1 \times 10^{-8}) = 6,3 \times 10^{-5} \text{ m}$.

18 1. a. La trajectoire a pour équation :

$$y(x) = -1/2 \cdot \frac{e \cdot E}{m \cdot v_0^2 \cdot \cos^2 \alpha} \cdot x^2 + x \cdot \tan \alpha.$$

b. Il s'agit d'une parabole.

2. a. Les coordonnées du point C sont $x_C = \ell$ et $y_C = 0$. En utilisant ces coordonnées, l'équation de la trajectoire devient :

$$0 = -\frac{e \cdot E}{2m \cdot v_0^2 \cdot \cos^2 \alpha} \cdot \ell^2 + \ell \cdot \tan \alpha$$

soit $\frac{e \cdot E}{2m \cdot v_0^2 \cdot \cos^2 \alpha} \cdot \ell^2 = \ell \cdot \tan \alpha$.

$$\begin{aligned} \text{Puis } e \cdot E \cdot \ell &= 2m \cdot v_0^2 \cdot \cos^2 \alpha \cdot \tan \alpha \\ &= 2m \cdot v_0^2 \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha = m \cdot v_0^2 \cdot \sin 2\alpha. \end{aligned}$$

$$\text{Soit } \sin 2\alpha = \frac{e \cdot E \cdot \ell}{m \cdot v_0^2}$$

b. $\alpha = 6,0^\circ$.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

19 1. À $t = 0$, $y(0) = 1,00$ m.

2. $v_x(t) = -8,00t + 6,00$ et $v_y(t) = 3,00 = v_y$.

3. $v_{0x} = 6,00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $v_{0y} = 3,00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;
la valeur de la vitesse est $v_0 = 6,70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

4. $v_{0y}/v_{0x} = v_0 \cdot \sin \alpha / (v_0 \cdot \cos \alpha) = \tan \alpha$, donc :
 $\alpha = \tan^{-1}(3,00/6,00) = 26,0^\circ$.

5. $a_x = -8,00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ et $a_y = 0,00$. Le vecteur accélération est donc vertical, orienté dans le sens opposé à (Oy), soit vers le bas. Son intensité est $a = \sqrt{a_x^2} = 8,00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

6. Le vecteur $\Sigma \vec{F}$ a même sens et même direction que le vecteur accélération.

Son intensité est $\Sigma F = a/m = 8,00/0,250 = 32,0$ N.

20 1. L'action de la Terre, modélisée par son poids \vec{P} .

2. $P = m \cdot g_0 = \rho_v \cdot V \cdot g_0 = \rho_v \cdot 4/3 \times \pi \cdot r^3 \cdot g_0$
 $= 1,0 \times 10^{-1}$ N

$P_A = \rho_{\text{air}} \cdot V \cdot g_0 = \rho_{\text{air}} \cdot 4/3 \times \pi \cdot r^3 \cdot g_0 = 5,3 \times 10^{-5}$ N.

3. La poussée d'Archimède est 1 923 fois plus petite que le poids, on peut donc la négliger.

4. Un ballon de baudruche gonflé à l'aide d'un gaz très léger comme l'hélium par exemple.

21 1. Le référentiel terrestre considéré comme galiléen.

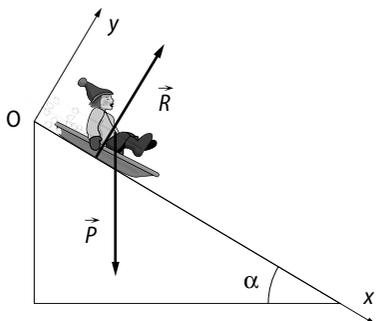
2. Graphiquement à $t = 0$, la vitesse est $v_0 = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. a. L'accélérateur est le coefficient directeur de la courbe. $a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{(3-2)}{(1-0)} = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

b. La direction de l'accélération est parallèle à la piste, et son sens est celui du mouvement, puisque la vitesse augmente. Les coordonnées de l'accélération sont $(a ; 0)$.

4. a. L'action de la Terre modélisée par le vecteur $\vec{P} = m \cdot \vec{g}_0$ et l'action de la piste modélisée par la force \vec{R} sur le système.

b.



5. a. D'après la deuxième loi de Newton : $\vec{P} + \vec{R} = m \cdot \vec{a}_G$

b. Sur (Ox) on a l'équation :

$$m \cdot g_0 \cdot \sin \alpha + 0 = m \cdot a = m$$

et sur (Oy) l'équation : $m \cdot g_0 \cdot \cos \alpha + R = 0$.

c. Comme R est inconnue, on utilise $m \cdot g_0 \cdot \sin \alpha = m$ et donc $\sin \alpha = 1/g_0$, soit $\alpha = \sin^{-1}(1/g_0) = 6^\circ$.

22 1. a. Rectiligne uniformément ralenti.

b. $a = \Delta v / \Delta t = (3,0 - 0) / (3,0 - 0) = 1,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

2. a. La deuxième loi de Newton permet d'écrire $\Sigma \vec{F} = m \cdot \vec{a}$. La résultante des forces est de même sens que l'accélération, c'est-à-dire opposé au sens du mouvement, et a pour direction la portion de droite entre le point de départ de la balle et le trou. Sa valeur est :

$$\Sigma F = m \cdot a = 0,046 \text{ N}.$$

b. Cette résultante des forces modélise les frottements entre le green et la balle.

23 1. Le référentiel terrestre considéré comme galiléen.

2. Un repère constitué d'un axe vertical (Oz) orienté vers le haut, dont l'origine correspond au point où la balle est lancée.

3. $\Sigma \vec{F} = m \cdot \vec{a} = \vec{P} = m \cdot \vec{g}_0$.

a. $a_z = -g_0$.

b. $v_z(t) = -g_0 \cdot t + v_0$ et $z(t) = -1/2 \cdot g_0 \cdot t^2 + v_0 \cdot t$.

4. Quand $z(t) = h$, $v_z(t) = 0$, on peut alors déduire $t = v_0/g_0$ et en reportant cette expression dans $z(t)$ on obtient :

$$z(t) = 1/2 v_0^2/g_0 = h.$$

On calcule $v_0 = \sqrt{\frac{2h}{g_0}} = 2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

5. La durée totale du mouvement est $2t = 2v_0/g_0$, on a :
 $t = 0,41$ s.

24 1. Le projectile est soumis uniquement à son poids. D'après la deuxième loi de Newton :

$$m \cdot \vec{g}_0 = m \cdot \vec{a} \text{ et donc } \vec{g}_0 = \vec{a}.$$

Le vecteur accélération \vec{a} du centre d'inertie G du projectile ne dépend pas des conditions initiales. L'affirmation est vraie.

2. Comme $\vec{g}_0 = \vec{a}$, la projection suivant l'axe vertical (Oz) donne $a_z = -g_0$.

Soit $v_z(t) = -g_0 \cdot t + v_{0z} = -g_0 \cdot t + v_0 \cdot \sin \alpha$, v_z varie au cours du temps, le mouvement du projeté de G suivant l'axe vertical (Oz) n'est pas uniforme. L'affirmation est fautive.

3. L'équation de la trajectoire de G est :

$$z = -\frac{1}{2} g_0 \cdot \left(\frac{x}{v_0 \cdot \cos \alpha} \right)^2 + x \cdot \tan \alpha.$$

Le mouvement est parabolique sauf pour $\alpha = 90^\circ$. L'affirmation est fautive.

4. Les coordonnées du vecteur position avec $\alpha = 0$ sont :

$$\overrightarrow{OG} \begin{cases} x = v_0 \cdot t \\ z = -\frac{1}{2} \cdot g_0 \cdot t^2 \end{cases}$$

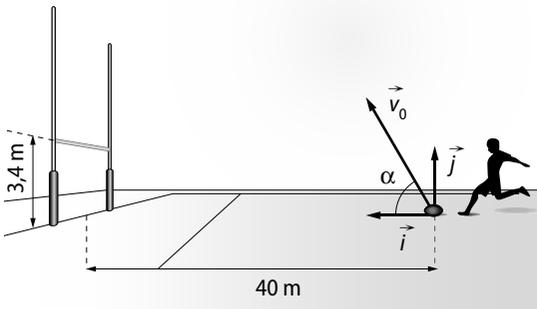
Lorsque $z = -H$, alors le projectile touche le sol, ceci a lieu à l'instant noté t_5 .

$$-H = -\frac{1}{2} \cdot g_0 \cdot t_5^2, \text{ soit } t_5^2 = \frac{2H}{g_0} \text{ et donc } t_5 = \sqrt{\frac{2H}{g_0}}.$$

On calcule alors l'abscisse x à cet instant :

$$x = v_0 \cdot t_5 = v_0 \cdot \sqrt{\frac{2H}{g_0}}. \text{ L'affirmation est vraie.}$$

25 1.



2. Sur l'axe des abscisses : $v_{0x} = v_0 \cos \alpha$.

Sur l'axe des ordonnées : $v_{0y} = v_0 \sin \alpha$.

3. D'après la deuxième loi de Newton $m \cdot \vec{a}_G = m \cdot \vec{g}_0$ soit $\vec{a}_G = \vec{g}_0$. Les coordonnées du vecteur accélération sont donc $a_x = 0$ et $a_y = -g_0$.

4. Par intégration, on obtient $v_x(t) = v_0 \cdot \cos \alpha$ et $v_y(t) = -g_0 \cdot t + v_0 \cdot \sin \alpha$. De même $x(t) = (v_0 \cdot \cos \alpha) \cdot t$ et $y(t) = -1/2 g_0 \cdot t^2 + (v_0 \cdot \sin \alpha) \cdot t$.

5. En éliminant le temps t des expressions $x(t)$ et $y(t)$, on obtient $y(x) = -\frac{1}{2} \cdot g_0 \cdot \left(\frac{x}{v_0 \cdot \cos \alpha}\right)^2 + x \cdot \tan \alpha$.

6. Pour $x = 40$ m et $y = 3,4$ m, la transformation est réussie si $y(40) \geq 3,4$ m. On obtient après résolution de cette inéquation : $v_0 \geq 21,1$ m \cdot s $^{-1}$. La valeur minimale est donc $v_{0 \min} = 21,1$ m \cdot s $^{-1}$.

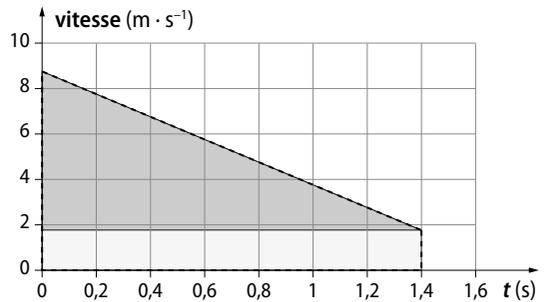
7. Il lui faut taper le ballon plus horizontalement afin d'obtenir un angle voisin de 45°.

26 1. a. $v_{0x} = v_0 \cdot \cos \alpha$ et $v_{0y} = v_0 \cdot \sin \alpha$.

b. $v_{0x} = 10$ m \cdot s $^{-1}$ et $v_{0y} = 8,7$ m \cdot s $^{-1}$ soit $v_0 = 13,3$ m \cdot s $^{-1}$.
 $v_{0y}/v_{0x} = v_0 \cdot \sin \alpha / v_0 \cdot \cos \alpha = \tan \alpha$, et donc :
 $\alpha = \tan^{-1}(8,7/10) = 41^\circ$.

2. a. b. L'aire A_1 sous la courbe $v_x(t)$ est celle d'un rectangle $A_1 = 10 \times 1,4 = 14$ m \cdot s $^{-1} \cdot$ s = 14 m.

L'aire A_2 sous la courbe $v_z(t)$ est la somme de la surface du triangle rectangle gris foncé et du rectangle gris clair.



$$A_2 = 1,8 \times 1,4 + 1/2 \times (8,7 - 1,8) \times 1,4 = 7,35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{s} = 7,35 \text{ m}.$$

c. Ces aires correspondent respectivement aux déplacements $x(t)$ et $z(t)$ pour $t = 1,4$ s.

27 1. Le champ est dirigé vers l'armature chargée négativement, il est perpendiculaire aux armatures, son intensité est constante.

2. a. La deuxième loi de Newton permet d'écrire $\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$ soit $m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = m \cdot \vec{a} = -e \cdot \vec{E}_1$.

En projetant cette relation sur (Ox_1) , on a :

$$a_{x1} = -e \cdot (-E_1)/m.$$

Par intégration, on détermine :

$$v_1(t) = \frac{e \cdot E_1}{m} t \text{ et } x_1(t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{e \cdot E_1}{m} t^2.$$

b. et c. L'électron arrive en B à l'instant t , tel que :

$$t = m \cdot v_1 / (e \cdot E_1).$$

on a alors $x_1(t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{e \cdot E_1}{m} \left(\frac{m \cdot v_1}{e \cdot E_1}\right)^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{m \cdot v_1^2}{e \cdot E_1} = d_{AB}$.

On a donc $v_1^2 = \frac{2e \cdot E_1 \cdot d_{AB}}{m} = \frac{2e \cdot U_{AB}}{m}$.

$$\text{soit } v_1 = \sqrt{\frac{2e \cdot U_{AB}}{m}}.$$

Le calcul donne $v_1^2 = 2 \times 1,6 \times 10^{-19} \times 18 \times 10^2 / (9 \times 10^{-31}) = 2 \times 1,6 \times 2 \times 10^{-17} / 10^{-31} = 6,4 \times 10^{14} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$.

Puis $v_1 = 2,5 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. La deuxième loi de Newton permet d'écrire :

$$m \cdot \vec{a} = -e \cdot \vec{E}_2.$$

Comme précédemment, on détermine :

$$v_{2x} = v_1 \text{ et } v_{2z} = \frac{e \cdot E_2}{m} t.$$

Puis $x_2(t) = v_1 \cdot t$ et $z_2(t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{e \cdot E_2}{m} t^2$.

L'équation de la trajectoire s'obtient en posant $t = x_2/v_1$ et en reportant cette expression dans $z_2(t)$. On obtient :

$$z(x) = \frac{1}{2} \cdot \frac{e \cdot E_2}{m} \left(\frac{x_2}{v_1}\right)^2.$$

EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

28 1. La chute étant supposée libre, le grêlon n'est soumis qu'à son propre poids, la deuxième loi de Newton donne $m \cdot \vec{g}_0 = m \cdot \vec{a}$ soit $\vec{g}_0 = \vec{a}$.

En projetant sur l'axe (Oz), on obtient $a_z = g_0$.

Par intégration, on obtient $v_z(t) = g_0 \cdot t + v_{0z}$ avec $v_{0z} = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et donc $v_z(t) = g_0 \cdot t$.

De même par intégration, on obtient $z(t) = 1/2 g_0 \cdot t^2 + z_0$ avec à $t = 0$, $z_0 = 0 \text{ m}$, d'où $z(t) = 1/2 g_0 \cdot t^2$.

2. Soit t_s l'instant où le grêlon touche le sol, on a :

$$z(t_s) = h = 1/2 g_0 \cdot t_s^2, \text{ soit } t_s = \sqrt{\frac{2h}{g_0}}.$$

Reportons cette expression dans :

$$v_z(t_s) = g_0 \cdot t_s = g_0 \cdot \sqrt{\frac{2h}{g_0}}, \text{ on obtient :}$$

$$v_z(t_s) = \sqrt{2 h \cdot g_0} = \sqrt{2 \times 9,80 \times 1500} = 171 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \text{ soit } 617 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}, \text{ valeur supérieure aux } 160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \text{ donnés dans le texte, cette valeur n'est donc pas vraisemblable.}$$

$$\mathbf{3.} [K] = \frac{[F]}{[v^2]} = \frac{\text{M} \cdot \text{L} \cdot \text{T}^{-2}}{\text{L}^2 \cdot \text{T}^{-2}} = \text{M} \cdot \text{L}^{-1}, K \text{ s'exprime donc en } \text{kg} \cdot \text{m}^{-1}.$$

$$\mathbf{4.} P_A = \rho \cdot V \cdot g_0 = \rho \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot g_0$$

$$= \frac{4}{3} \pi \times \left(\frac{3,0}{2} \times 10^{-2} \right)^3 \times 1,3 \times 9,80 = 1,8 \times 10^{-4} \text{ N.}$$

$P = m \cdot g_0 = 13 \times 10^{-3} \times 9,80 = 0,13 \text{ N}$, ce poids est bien plus élevé que la valeur de la poussée d'Archimède, que l'on peut négliger.

5. a. La deuxième loi de Newton donne $\vec{P} + \vec{F} = m \cdot \vec{a}$.

Cette relation projetée sur l'axe (Oz) devient :

$$P - F = m \cdot a_z, \text{ soit } m \cdot \frac{dv}{dt} = m \cdot g_0 - K \cdot v^2.$$

Cette équation peut s'écrire : $\frac{dv}{dt} = g_0 - \frac{K}{m} \cdot v^2$

qui est de la forme $\frac{dv}{dt} = A - B \cdot v^2$.

b. De l'expression précédente, on a à un instant t_i :

$$a(t_i) = A - B \cdot v(t_i)^2.$$

On peut donc calculer :

$$a(t_4) = A - B \cdot v(t_4)^2 = 9,80 - 1,56 \times 10^{-2} \times 17,2^2 = 5,18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

Comme $a = \Delta v / \Delta t$, la vitesse à un instant t_{i+1} peut s'écrire :

$$v(t_{i+1}) = v(t_i) + a(t_i) \cdot \Delta t.$$

On a donc $v(t_5) = v(t_4) + a(t_4) \cdot \Delta t = 17,2 + 5,18 \times 0,5 = 19,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

c. Quand la vitesse limite est atteinte, on a :

$$\frac{dv}{dt} = 0 = A - B \cdot v_{\text{lim}}^2$$

soit $v_{\text{lim}} = \sqrt{\frac{A}{B}} = \sqrt{\frac{9,80}{1,56 \times 10^{-2}}} = 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, valeur bien

plus proche de la vitesse réelle des grêlons.

Mouvement dans l'espace

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
<ul style="list-style-type: none"> - Principe des actions réciproques. - Conservation de la quantité de mouvement d'un système isolé. - Mouvement d'un satellite. - Révolution de la Terre autour du Soleil. - Lois de Kepler. 	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour interpréter un mode de propulsion par réaction à l'aide d'un bilan qualitatif de quantité de mouvement.</i> - Démontrer que, dans l'approximation des trajectoires circulaires, le mouvement d'un satellite, d'une planète, est uniforme. Établir l'expression de sa vitesse et de sa période. - Connaître les trois lois de Kepler ; exploiter la troisième dans le cas d'un mouvement circulaire.

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Interpréter un mode de propulsion par réaction.
2. Décrire les caractéristiques du mouvement d'une planète ou d'un satellite.
3. Connaître les lois de Kepler et exploiter la troisième.

Évaluation diagnostique p. 164

SITUATION 1

Cette situation permet d'introduire le principe des actions réciproques sur un exemple simple que les élèves connaissent bien. Lorsqu'on alimente en eau l'arroseur tourniquet, il va se mettre à tourner sur lui-même. En effet, lorsque ce tourniquet est alimenté, il exerce une action sur l'eau qu'il expulse, il existe alors une action de l'eau sur le tourniquet qui provoque sa rotation dans le sens opposé aux jets d'eau.

Le même raisonnement est demandé aux élèves au début de l'**activité 1** afin d'interpréter un mode de propulsion par réaction.

SITUATION 2

Il s'agit de vérifier que les élèves connaissent bien la loi de la gravitation universelle. En effet, c'est la force d'attraction gravitationnelle exercée par la Terre sur la Lune qui permet d'expliquer son mouvement.

Dans l'**activité 2**, les élèves vont retrouver cette loi dans un texte de Voltaire.

SITUATION 3

Cette situation permet de traquer les idées fausses concernant le mouvement des planètes autour du Soleil. En effet, l'orbite de ces planètes n'est pas circulaire mais elliptique et leurs vitesses de rotation autour du Soleil n'est pas constante.

Les élèves pourront découvrir cela dans l'**activité 2** avec les exemples de la Terre et de Neptune ainsi que dans l'**activité 3** avec les énoncés des trois lois de Kepler. Ils découvriront également à quelle condition on peut se placer dans l'approximation des trajectoires circulaires.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

Mode de propulsion par réaction

p. 166

1. a. Il suffit qu'une personne gonfle ce ballon, le ferme puis le lâche en laissant l'air intérieur s'échapper dans la salle.

2. Ce ballon n'a pas besoin de l'air de la salle pour voler mais uniquement de l'air qui est à l'intérieur du ballon. Il pourrait donc voler dans le vide.

3. On peut alors assimiler le ballon de baudruche au corps de la fusée et l'air qu'il contient au mélange combustible + comburant que contient la fusée.

4. À $t = 0$, on a $\vec{p}_{(S)}(t=0) = m_0 \cdot \vec{0} = \vec{0}$.

5. a. À l'instant t , on a :

$$\vec{p}_{(S)}(t) = \vec{p}_{(\text{gaz éjectés})}(t) + \vec{p}_{(\text{fusée})}(t).$$

b. Comme le système (S) est isolé, sa quantité de mouvement se conserve, donc $\vec{p}_{(S)}(t=0) = \vec{p}_{(S)}(t)$ donc

$$\vec{0} = m_g \cdot \vec{v}_g + m_f \cdot \vec{v}_f, \text{ soit } \vec{v}_f = -\frac{m_g \cdot \vec{v}_g}{m_f}.$$

6. La vitesse de la fusée dépend uniquement de la vitesse des gaz expulsés, de leur masse et de la masse de la fusée. Les gaz expulsés par la fusée sont donc à l'origine de son mouvement : c'est le mode propulsion par réaction.

ACTIVITÉ 2

Mouvement d'une planète

p. 167

1. a. La loi de la gravitation a été découverte par Isaac Newton (1643-1727).

b. On trouve dans le texte : «...c'est la gravitation qui le fait tourner autour de ce centre... ». En effet, c'est l'action mécanique exercée par le Soleil sur la planète qui permet d'expliquer son mouvement.

2. On trouve dans le texte : « Un corps se mouvant autour d'un centre pèse donc en raison inverse du carré de sa distance actuelle au centre, comme aussi en raison directe de sa masse... ». On a ainsi $F_{S/T} = \frac{G \cdot m_S \cdot m_T}{d_{S/T}^2}$

avec $F_{S/T}$ en Newton (N) ; G la constante de gravitation universelle : $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ (ou $\text{N} \cdot \text{kg}^{-2} \cdot \text{m}^2$) ; m_S et m_T les masses du Soleil et de la Terre en kilogramme (kg) et $d_{S/T}$ la distance entre le centre du Soleil et le centre de la Terre en mètre (m).

3. a. On trouve dans le texte : «...sans cette gravitation, il s'en éloignerait en décrivant une tangente. ». Sans cette action mécanique, la Terre quitterait le système solaire en suivant une trajectoire rectiligne.

b. Si la Terre ne subissait plus d'interaction gravitationnelle, alors elle ne serait soumise à aucune action mécanique, le principe d'inertie serait donc bien vérifié et le mouvement de la Terre serait rectiligne uniforme.

4. On trouve dans le texte : «...plus ce mobile sera éloigné, plus il tournera lentement... », et comme Neptune est plus éloignée du Soleil que la Terre, alors Neptune tourne moins vite que la Terre autour du Soleil.

5. a. Lorsque $e = 0$, on a $c = 0$ et donc les points O, F et F' sont confondus. L'ellipse devient donc un cercle de centre $C = O$ et de rayon $r = a$.

b. Les excentricités de la Terre et de Neptune sont très faibles, on peut donc considérer que leurs orbites sont des cercles. Cela constitue l'approximation des trajectoires circulaires.

6. a. Ces planètes décrivent alors des cercles de circonférence $2\pi r$ (avec $r = a$) pendant une durée T à la vitesse v , on a donc $v = \frac{2\pi r}{T}$, d'où :

$$v_T = \frac{2 \times \pi \times 150 \times 10^6}{1,00 \times 365,25 \times 24 \times 3600} = 29,9 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} ;$$

$$v_N = \frac{2 \times \pi \times 4488 \times 10^6}{165 \times 365,25 \times 24 \times 3600} = 5,42 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}.$$

b. Ces valeurs sont bien cohérentes avec la réponse de la question 4 puisque $v_N < v_T$.

7. La vitesse v d'une planète diminue lorsque r augmente, donc elle ne peut pas être proportionnelle à \sqrt{r} ni à r . De plus, on a $\frac{v_T}{v_N} = \frac{29,9}{5,42} = 5,52$. Or on constate

que $\sqrt{\frac{r_N}{r_T}} = \sqrt{\frac{4488}{150}} = 5,47$. On en conclut que la vitesse

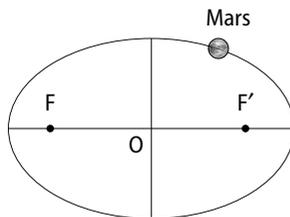
d'une planète en orbite autour du Soleil est proportionnelle à $\frac{1}{\sqrt{r}}$.

ACTIVITÉ 3

Les lois de Kepler

p. 168

1. a.



b. D'après le document 1 :

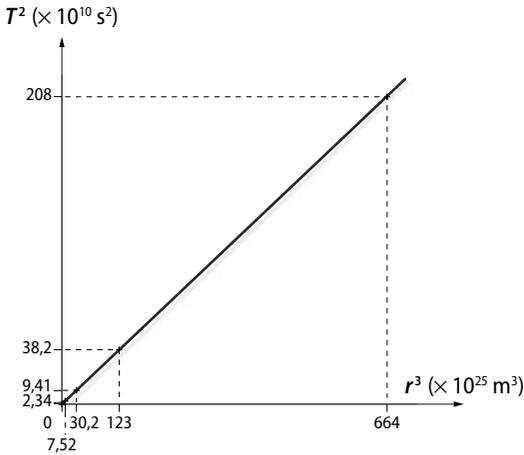
- Première loi : l'orbite d'une planète du système solaire est elliptique et le Soleil occupe un des foyers de l'ellipse.
- Deuxième loi : les aires balayées en des temps égaux par la droite joignant la planète au Soleil sont égales.
- Troisième loi : le carré de la période de révolution des planètes est proportionnel au cube de leur distance moyenne au Soleil.

c. On peut en déduire que la vitesse d'une planète n'est pas constante sur son orbite, elle augmente lorsque la planète se rapproche du Soleil et diminue lorsqu'elle s'en éloigne.

2. a. Dans le cas des lunes galiléennes, l'astre attracteur est Jupiter.

b. Troisième loi appliquée aux lunes galiléennes : le carré de la période de révolution des lunes Galiléennes est proportionnel au cube de leur distance à Jupiter (rayon de l'orbite quasi circulaire).

3. a. On peut utiliser l'échelle suivante : en abscisse : 1 cm pour $20,0 \times 10^{10} \text{ s}^2$ et en ordonnée : 1 cm pour $60,0 \times 10^{25} \text{ m}^3$.



b. Les points sont alignés suivant une droite, la troisième loi de Kepler est donc bien vérifiée : le carré de la période de révolution des lunes galiléennes est proportionnel au cube de leur distance à Jupiter.

4. D'après les lois de Kepler :

- les trajectoires des planètes et des satellites sont des ellipses dont l'astre attracteur est l'un des foyers ;
- la vitesse des planètes et des satellites n'est pas constante, elle augmente lorsque la planète ou le satellite se rapproche du Soleil et diminue lorsqu'il s'en éloigne ;
- le carré de la période de révolution des planètes et des satellites est proportionnel au cube de leur distance moyenne à l'astre attracteur.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : Interpréter un mode de propulsion par réaction

1 1. a et b.

2. b et c.

3. a et c.

4. b et c.

2 1. Les deux forces sont :

- la force exercée par la Terre sur le livre (origine : centre d'inertie du livre ; direction : verticale ; sens : vers le bas ; intensité : $F_{\text{Terre/livre}} = P = 8,2 \text{ N}$) ;
- la force exercée par la table sur le livre (origine : centre d'inertie du livre ; direction : verticale ; sens : vers le haut ; intensité : $F_{\text{table/livre}} = F_{\text{Terre/livre}} = 8,2 \text{ N}$).

2. D'après le principe des actions réciproques, ce livre exerce une action mécanique sur la table, modélisée par une force d'égale intensité, de même direction mais de sens opposé à celle qui modélise l'action mécanique qu'exerce la table sur le livre.

Les caractéristiques de cette force sont les suivantes :
origine : centre d'inertie du livre ; direction : verticale ; sens : vers le bas ; intensité :

$$F_{\text{livre/table}} = F_{\text{table/livre}} = 8,2 \text{ N.}$$

3 Les valeurs indiquées sont identiques (environ 2 N). D'après le principe des actions réciproques, le dynamomètre (D_1) exerce une action mécanique sur le dynamomètre (D_2) modélisée par une force d'égale intensité, de même direction mais de sens opposé à celle qui modélise l'action mécanique qu'exerce le dynamomètre (D_2) sur le dynamomètre (D_1). Donc $F_{D_1/D_2} = F_{D_2/D_1}$.

4 1. a. Après le lancer, Louisa et son canoë vont se déplacer dans le sens opposé à la pierre.

b. D'après le principe des actions réciproques, Louisa exerce une action mécanique sur la pierre modélisée par une force d'égale intensité, de même direction mais de sens opposé à celle qui modélise l'action mécanique qu'exerce la pierre sur Louisa. C'est cette dernière action mécanique qui est responsable du mouvement de Louisa et de son canoë.

2. a. Avant le lancer, le système (S) est un système pseudo-isolé car les actions mécaniques extérieures qui s'exercent sur lui se compensent.

b. On a $\vec{p}_{\text{avant}}(S) = (m_L + m_C + m_P) \cdot \vec{0} = \vec{0}$.

3. a. On a $\vec{p}_{\text{après}}(S) = (m_L + m_C) \cdot \vec{v} + m_P \cdot \vec{v}_P$. Comme le système (S) est pseudo-isolé, sa quantité de mouvement se conserve, on a $\vec{p}_{\text{avant}}(S) = \vec{p}_{\text{après}}(S)$,

$$\text{donc} \quad \vec{0} = (m_L + m_C) \cdot \vec{v} + m_P \cdot \vec{v}_P$$

$$\text{et donc finalement} \quad \vec{v} = -\frac{m_P \cdot \vec{v}_P}{m_L + m_C}$$

$$\text{Donc } v = \frac{m_P \cdot v_P}{m_L + m_C} = \frac{4,2 \times 2,5}{55 + 39} = 0,11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

b. On constate, grâce à l'égalité vectorielle, que le sens \vec{v} est opposé à celui de \vec{v}_P ; donc le canoë et Louisa se déplacent vers l'avant du canoë.

Le mouvement du canoë est alors rectiligne uniforme. Cela n'est vrai que si on peut négliger tous les frottements, ce qui n'est bien sûr pas le cas dans la réalité.

5 Scooter des mers

Un scooter des mers (ou jet ski) est un petit véhicule de loisir nautique propulsé par un hydrojet. Un hydrojet est un système de propulsion par réaction : l'eau est pompée sous le bateau puis accélérée par l'intermédiaire d'une turbine et enfin expulsée à haute vitesse derrière celui-ci.

1. Expliquer pourquoi l'hydrojet est un système de propulsion par réaction.

L'eau expulsée à haute vitesse derrière le scooter des mers est à l'origine de son mouvement : c'est le mode de propulsion par réaction.

2. Quelles sont les principales différences entre le mode de propulsion d'un scooter des mers et celui d'une fusée ? Le scooter des mers expulse de l'eau alors que la fusée expulse des gaz. De plus, le scooter des mers utilise l'eau présente dans la mer alors que la fusée embarque à son bord son combustible et son comburant.

3. Que peut-on dire du vecteur quantité de mouvement du scooter des mers ?

Par analogie avec le mode de propulsion d'une fusée, on peut dire que le vecteur quantité de mouvement du scooter des mers est opposé à celui de l'eau expulsée.

4. Un scooter des mers est capable de faire marche arrière. Expliquer comment cela est possible.

Un dispositif de l'hydrojet permet de détourner la sortie d'eau vers l'avant, ainsi le scooter des mers est propulsé vers l'arrière.

COMPÉTENCE 2 : Décrire les caractéristiques du mouvement d'une planète ou d'un satellite

6 1. Faux. Elle s'applique à tous les objets massiques de l'Univers.

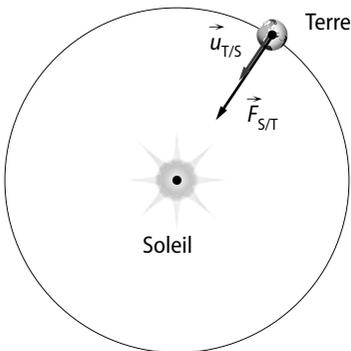
2. Vrai.

3. Faux. $a = v^2/r$.

4. Faux. C'est la durée qu'il lui faut pour faire un tour sur son orbite.

8 1. On doit se placer dans le référentiel héliocentrique galiléen.

2. $\vec{F}_{S/T} = \frac{G \cdot M_S \cdot M_T}{d_{ST}^2} \cdot \vec{u}_{TS}$ où \vec{u}_{TS} est un vecteur unitaire porté par la droite (ST) orienté de T vers S.



3. On applique la deuxième loi de Newton à la Terre : $d\vec{p}/dt = \vec{F}_{S/T}$

donc $M_T \cdot d\vec{v}_T/dt = \frac{G \cdot M_S \cdot M_T}{d_{ST}^2} \cdot \vec{u}_{TS}$

donc $\vec{a}_T = \frac{G \cdot M_S}{d_{ST}^2} \cdot \vec{u}_{TS}$

4. On a alors $\vec{v}_T \cdot \vec{a}_T = 0$, donc le mouvement de la Terre est uniforme.

5. On a $a_T = \frac{G \cdot M_S}{d_{ST}^2} = \frac{v_T^2}{d_{ST}}$ (car le mouvement est uniforme), donc $v_T = \sqrt{\frac{G \cdot M_S}{d_{ST}}}$.

Donc $v_T = \sqrt{\frac{G \cdot M_S}{d_{ST}}} = \sqrt{\frac{6,67 \times 10^{-11} \times 1,99 \times 10^{30}}{149,6 \times 10^9}}$
 $= 2,98 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

6. L'orbite de la Terre est un cercle de rayon d_{ST} donc la distance parcourue pendant la durée T_T est la circonférence du cercle $2\pi \cdot d_{ST}$ donc :

$T_T = \frac{2\pi \cdot d_{ST}}{v_T} = \frac{2\pi \times 149,6 \times 10^9}{2,98 \times 10^4} = 3,15 \times 10^7 \text{ s}$.

Donc $T_T = \frac{3,15 \times 10^7}{24 \times 3600} = 365 \text{ j}$.

9 1. L'orbite de la Lune est un cercle de rayon r_L donc la distance parcourue pendant la durée T_L est la circonférence du cercle $2\pi \cdot r_L$ donc :

$T_L = \frac{2\pi r_L}{v_L} = \frac{2\pi \times 3,84 \times 10^8}{1,02 \times 10^3} = 2,37 \times 10^6 \text{ s}$.

2. a. On convertit T_L en jours : $T_L = \frac{2,37 \times 10^6}{24 \times 3600} = 27,4 \text{ j}$.

Ces deux périodes sont donc quasiment égales.

b. La Lune présente donc toujours le même hémisphère (nommé « face visible de la Lune ») à un observateur terrestre (l'autre hémisphère est donc appelé « face cachée de la Lune »).

COMPÉTENCE 3 : Connaître les lois de Kepler et exploiter la troisième

10 1. Faux. C'est l'inverse.

2. Vrai.

3. Vrai.

4. Faux. Elle dépend de la masse de l'astre attracteur.

5. Vrai.

11 1. Un référentiel planétocentrique est un référentiel centré sur une planète et dont les trois axes sont dirigés vers trois étoiles fixes.

2. Première loi de Kepler : dans un référentiel planétocentrique, l'orbite d'un satellite est une ellipse dont le centre de la planète occupe un des deux foyers.

Deuxième loi de Kepler : le segment reliant la planète au satellite balaye des aires égales pendant des durées égales.

Troisième loi de Kepler : le rapport entre le carré de la période de révolution T du satellite et le cube du demi-grand axe a de son orbite elliptique est constant, soit : $\frac{T^2}{a^3} = k$ avec T en seconde (s), a en mètre (m) et k est une constante qui ne dépend que de l'astre attracteur : la planète.

$$k = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_p}$$
 avec G constante de gravitation universelle :

$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ et M_p masse de la planète en kilogramme (kg).

3. Si le satellite a une trajectoire circulaire, alors on peut déduire de la deuxième loi de Kepler que sa vitesse est constante.

4. a. La troisième loi de Kepler devient : le rapport entre le carré de la période de révolution T du satellite et le cube du rayon r de son orbite circulaire est constant, soit :

$$\frac{T^2}{r^3} = k$$
 avec T en seconde (s) et r en mètre (m) (l'expression de k est inchangée).

b. On a donc $r = \sqrt[3]{\frac{T^2 \cdot G \cdot M_p}{4\pi^2}}$.

12 1. On doit se placer dans un référentiel centré sur Saturne supposé galiléen.

2. Troisième loi de Kepler : le rapport entre le carré de la période de révolution T_E d'Encelade et le cube du rayon r_E de son orbite circulaire est constant, soit :

$$\frac{T_E^2}{r_E^3} = k$$
 avec T_E en seconde (s), r_E en mètre (m) et k est

une constante qui ne dépend que de l'astre attracteur : Saturne.

$$k = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_S}$$
 avec G constante de gravitation universelle :

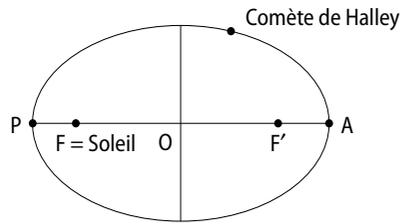
$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ et M_S masse de Saturne en kilogramme (kg).

3. On a donc :

$$r_E = \sqrt[3]{\frac{T_E^2 \cdot G \cdot M_S}{4\pi^2}} = \sqrt[3]{\frac{(1,37 \times 24 \times 3\,600)^2 \times 6,67 \times 10^{-11} \times 5,69 \times 10^{26}}{4\pi^2}} = 2,38 \times 10^8 \text{ m}.$$

13 1. a. Dans le référentiel héliocentrique, l'orbite de la comète de Halley est une ellipse dont le centre du Soleil occupe un des deux foyers.

b.



2. a. Le segment reliant le Soleil à la comète de Halley balaye des aires égales pendant des durées égales.

b. La vitesse de la comète de Halley n'est donc pas constante : elle augmente lorsque la comète se rapproche du Soleil et diminue lorsqu'elle s'en éloigne.

c. Sa vitesse est maximale au point P et minimale au point A.

14 Quelle est cette planète ?

Un satellite (S) décrit un mouvement circulaire uniforme autour d'une planète (P).

Données. Rayon de l'orbite du satellite : $r_S = 6,7 \times 10^5 \text{ km}$.

Période de révolution du satellite : $T_S = 3 \text{ j } 13 \text{ h } 14 \text{ min}$.

1. Que devient la troisième loi de Kepler dans le cas de ce satellite (S) en mouvement circulaire uniforme ?

La troisième loi de Kepler devient : le rapport entre le carré de la période de révolution T du satellite et le cube du rayon r de son orbite circulaire est constant, soit :

$$\frac{T^2}{r^3} = k$$
 avec T en seconde (s), r en mètre (m) et k est une

constante qui ne dépend que de l'astre attracteur : la planète (P).

$$k = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_p}$$
 avec G constante de gravitation universelle :

$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ et M_p masse de la planète en kilogramme (kg).

2. Calculer la période de révolution du satellite (S) en seconde.

$$T_S = 3 \times 24 \times 3\,600 + 13 \times 3\,600 + 14 \times 60 = 3,1 \times 10^5 \text{ s}.$$

3. a. Exprimer puis calculer la masse M_p de la planète (P).

D'après la troisième loi de Kepler, on a $\frac{T_S^2}{r_S^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_p}$ donc

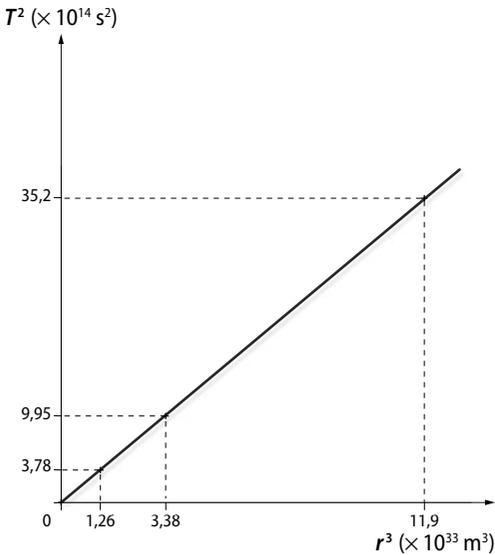
$$M_p = \frac{4\pi^2 \cdot r_S^3}{G \cdot T_S^2} = \frac{4\pi^2 \times (6,7 \times 10^8)^3}{6,67 \times 10^{-11} \times (3,1 \times 10^5)^2} = 1,9 \times 10^{27} \text{ kg}.$$

b. En déduire son identité.

D'après les données, la planète (P) est Jupiter.

15 1. On doit se placer dans le référentiel héliocentrique galiléen.

2. On peut utiliser l'échelle suivante : en abscisse, 1 cm pour $3,50 \times 10^{14} \text{ s}^2$ et en ordonnée, 1 cm pour $1,00 \times 10^{33} \text{ m}^3$.



- 3. a.** Les points sont alignés suivant une droite passant par l'origine, donc T^2 est proportionnelle à r^3 , la troisième loi de Kepler est donc bien vérifiée : le rapport entre le carré de la période de révolution des trois planètes et le cube du rayon de leur orbite est constant.
- b.** Soit a le coefficient directeur de la droite du graphe précédent, on a $a = 4\pi^2/(G \cdot M_S)$ donc $M_S = 4\pi^2/(G \cdot a)$ donc $M_S = 4\pi^2/(6,67 \times 10^{-11} \times 3,52 \times 10^{15}/(1,19 \times 10^{34})) = 2,00 \times 10^{30} \text{ kg}$.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

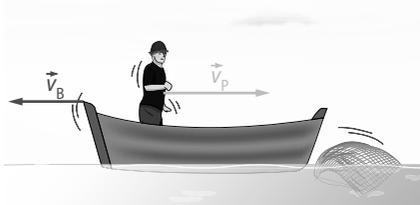
16 1. Le pêcheur ne va pas pouvoir récupérer son filet : comme il se déplace vers l'arrière, sa barque va se déplacer vers l'avant.

2. On définit le système (S), constitué du pêcheur et de sa barque. Ce système est pseudo-isolé, car les actions mécaniques extérieures qui s'exercent sur lui se compensent. Sa quantité de mouvement se conserve donc. $\vec{p}_{\text{avant}}(S) = \vec{p}_{\text{après}}(S)$.

$$\text{Donc } \vec{0} = m_B \cdot \vec{v}_B + m_P \cdot \vec{v}_P, \text{ soit } \vec{v}_B = -\frac{m_P \cdot \vec{v}_P}{m_B}.$$

$$v_B = \frac{m_P \cdot v_P}{m_B} = \frac{85 \times 1,3}{105} = 1,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

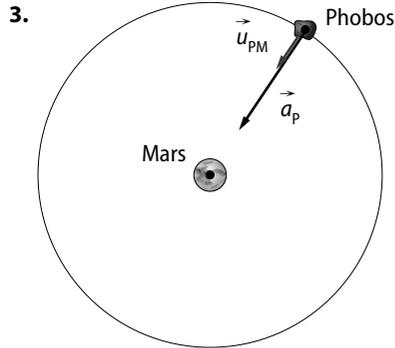
3. Longueur du vecteur vitesse \vec{v}_P : $1,3/0,4 = 3,3 \text{ cm}$.
Longueur du vecteur vitesse \vec{v}_B : $1,1/0,4 = 2,8 \text{ cm}$.



17 1. On doit se placer dans un référentiel centré sur Mars supposé galiléen.

2. On applique la deuxième loi de Newton à ce satellite : $d\vec{p}/dt = \vec{F}_{T/P}$ donc :

$$m_P \cdot d\vec{v}_P/dt = \frac{G \cdot M_M \cdot m_P}{r^2} \cdot \vec{u}_{PM} \text{ donc } \vec{a}_P = \frac{G \cdot M_M}{r^2} \cdot \vec{u}_{PM}.$$



4. On a alors $\vec{v}_P \cdot \vec{a}_P = 0$, donc le mouvement de Phobos est uniforme.

5. a. On a $a_P = \frac{v_P^2}{r}$ car le mouvement est uniforme.

b. On a alors $a_P = \frac{G \cdot M_M}{r^2} = \frac{v_P^2}{r}$ donc $v_P = \sqrt{\frac{G \cdot M_M}{r}}$.

$$\text{c. } \left[\sqrt{\frac{G \cdot M_M}{r}} \right] = \sqrt{\frac{L^3 \cdot M^{-1} \cdot T^{-2} \cdot M}{L}} = \sqrt{L^2 \cdot T^{-2}} = L \cdot T^{-1}$$

donc $\sqrt{\frac{G \cdot M_M}{r}}$ est bien homogène à une vitesse en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

$$\text{d. } v_P = \sqrt{\frac{G \cdot M_M}{r}} = \sqrt{\frac{6,67 \times 10^{-11} \times 6,42 \times 10^{23}}{9,38 \times 10^6}} = 2,14 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 2,14 \times 10^3 \times 3,6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} = 7,70 \times 10^3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}.$$

6. a. L'orbite de Phobos est un cercle de rayon r donc la distance parcourue pendant la durée T_P est la circonférence du cercle $2\pi \cdot r$ donc $T_P = \frac{2\pi \cdot r}{v_P}$.

$$\text{b. } \frac{T_P^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{v_P^2 \cdot r^2} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_M}.$$

c. On retrouve la troisième loi de Kepler.

$$\text{d. } T_P = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{r^3}{G \cdot M_M}} = 2\pi \sqrt{\frac{(9,38 \times 10^6)^3}{6,67 \times 10^{-11} \times 6,42 \times 10^{23}}} = 2,76 \times 10^4 \text{ s} = 7,67 \text{ h}.$$

18 1. Les gaz expulsés par la fusée Rockot sont à l'origine de son mouvement : c'est le mode de propulsion par réaction.

2. On doit se placer dans un référentiel géocentrique supposé galiléen.

3. D'après la troisième loi de Kepler, on a $\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_T}$

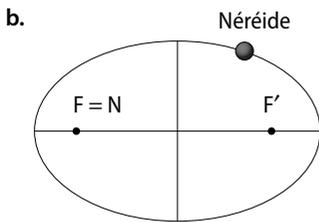
avec $r = R_T + h$.

$$\begin{aligned} \text{Donc } T &= 2\pi \cdot \sqrt{\frac{(R_T + h)^3}{G \cdot M_T}} \\ &= 2\pi \sqrt{\frac{(6,37 \times 10^6 + 265 \times 10^3)^3}{6,67 \times 10^{-11} \times 5,98 \times 10^{24}}} \\ &= 5,38 \times 10^3 \text{ s.} \end{aligned}$$

4. L'orbite du satellite GOCE est un cercle de rayon $R_T + h$. La distance parcourue pendant la durée T est la circonférence du cercle : $2\pi(R_T + h)$.

$$\begin{aligned} \text{On a donc : } v &= \frac{2\pi \cdot (R_T + h)}{T} \\ &= \frac{2\pi(6,37 \times 10^6 + 265 \times 10^3)}{5,38 \times 10^3} \\ &= 7,75 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}. \end{aligned}$$

19 1. a. L'orbite de Néréide est fortement excentrique, cela signifie que cette orbite est une ellipse très « allongée ».



c. D'après la deuxième loi de Kepler (le segment reliant Neptune à Néréide balaye des aires égales pendant des durées égales), la vitesse de Néréide n'est pas constante : elle augmente lorsque le satellite se rapproche de Neptune et diminue lorsqu'elle s'en éloigne.

2. L'orbite de Triton est un cercle de rayon r_T donc la distance parcourue pendant la durée T_T est la circonférence du cercle $2\pi \cdot r_T$ donc $T_T = \frac{2\pi \cdot r_T}{v_T}$.

$$\text{Donc } T_T = \frac{2\pi \times 3,6 \times 10^8}{4,4 \times 10^3} = 5,1 \times 10^5 \text{ s.}$$

3. a. Troisième loi de Kepler : le rapport entre le carré de la période de révolution T de chaque satellite de Neptune et le cube du demi-grand axe a de son orbite est constant, soit :

$\frac{T^2}{a^3} = k$ avec T en seconde (s), a en mètre (m) et k est une constante qui ne dépend que de l'astre attracteur : Neptune.

$$\text{b. On a donc } \frac{T_T^2}{r_T^3} = \frac{T_N^2}{a_N^3}.$$

$$\begin{aligned} \text{Donc } T_N &= T_T \cdot \sqrt{\frac{a_N^3}{r_T^3}} = 5,1 \times 10^5 \times \sqrt{\left(\frac{5,5 \times 10^9}{3,6 \times 10^8}\right)^3} \\ &= 3,0 \times 10^7 \text{ s.} \end{aligned}$$

20 1. a. D'après le principe des actions réciproques, la fusée exerce une action mécanique sur les gaz expulsés modélisée par une force d'égale intensité, de même direction mais de sens opposé à celle qui modélise l'action mécanique qu'exercent les gaz expulsés sur la fusée. C'est cette dernière action mécanique qui est responsable du mouvement d'ascension de la fusée.

b. Dans un référentiel galiléen, on considère un système isolé (S) constitué par la fusée ainsi que son contenu (y compris son combustible et son comburant) de masse m_0 . – À $t = 0$, le système est immobile, on a alors :

$$\vec{p}_{(S)}(t = 0) = m_0 \cdot \vec{0} = \vec{0}.$$

– À un instant t , la fusée a expulsé une certaine quantité de gaz, on a alors :

$$\vec{p}_{(S)}(t) = \vec{p}_{(\text{gaz expulsés})}(t) + \vec{p}_{(\text{fusée})}(t).$$

Comme, dans un référentiel galiléen, le vecteur quantité de mouvement d'un système isolé est constant : $\vec{p}_{(S)}(t = 0) = \vec{p}_{(S)}(t)$ donc $\vec{0} = \vec{p}_{(\text{gaz expulsés})}(t) + \vec{p}_{(\text{fusée})}(t)$.

Donc finalement $\vec{p}_{(\text{fusée})}(t) = -\vec{p}_{(\text{gaz expulsés})}(t)$.

c. Le lancement a eu lieu avec une heure de retard à cause des vents en altitude. Il fallait décaler le lancement sinon les vents auraient modifié la trajectoire de la fusée et les satellites n'auraient alors jamais atteint leurs orbites prévues.

2. a. Orbite de transfert géostationnaire : c'est une orbite elliptique intermédiaire qui permet de placer des satellites en orbite géostationnaire.

Orbite géostationnaire : c'est une orbite circulaire située à 35 786 km d'altitude au-dessus de l'équateur de la Terre, dans le plan équatorial.

b. Le satellite Astra 1N n'est pas placé par Ariane 5 directement sur son orbite définitive, puisqu'il est placé sur une orbite de transfert qui va lui permettre ensuite d'atteindre son orbite définitive.

3. a. On doit se placer dans un référentiel géocentrique supposé galiléen.

b. Dans ce référentiel, le satellite n'est soumis qu'à l'action mécanique exercée par la Terre. Elle est modélisée

$$\text{par la force : } \vec{F}_{T/S} = \frac{G \cdot m_S \cdot M_T}{r_S^2} \cdot \vec{u}_{ST}.$$

On applique alors la deuxième loi de Newton à ce satellite : $d\vec{p}/dt = \vec{F}_{T/S}$;

$$\text{donc } m_S \cdot d\vec{v}_S/dt = \frac{G \cdot m_S \cdot M_T}{r_S^2} \cdot \vec{u}_{ST}$$

$$\text{donc } \vec{a}_S = \frac{G \cdot M_T}{r_S^2} \cdot \vec{u}_{ST}.$$

c. On a alors $\vec{v}_S \cdot \vec{a}_S = 0$, donc le mouvement du satellite est uniforme.

d. On a $a_S = \frac{G \cdot M_T}{r_S^2} = \frac{v_S^2}{r_S}$ (car le mouvement est uniforme) donc $v_S = \sqrt{\frac{G \cdot M_T}{r_S}}$.

$$\text{Donc } v_S = \sqrt{\frac{6,67 \times 10^{-11} \times 5,98 \times 10^{24}}{4,2 \times 10^7}} = 3,1 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

e. L'orbite de ce satellite est un cercle de rayon r_S donc la distance parcourue pendant la durée T_S est la circonférence du cercle $2\pi \cdot r_S$ donc :

$$T_S = \frac{2\pi \cdot r_S}{v_S} = \frac{2\pi \times 4,2 \times 10^7}{3,1 \times 10^3} = 8,5 \times 10^4 \text{ s}.$$

$$\text{Donc } T_S = \frac{8,5 \times 10^4}{3600} = 24 \text{ h}.$$

f. Un satellite géostationnaire a une orbite circulaire dans le plan équatorial et sa période de révolution est égale à la période de rotation de la Terre sur elle-même. Il possède donc la particularité d'être toujours positionné au-dessus du même point de la surface de la Terre.

21 1. « Rotation rétrograde » : le mouvement de rotation de Vénus sur elle-même se fait dans le sens opposé à celui de Vénus autour du Soleil.

« Période de rotation » : c'est la durée nécessaire à Vénus pour faire un tour sur elle-même.

« Période de révolution » : c'est la durée nécessaire à Vénus pour faire un tour sur son orbite autour du Soleil.

2. On doit se placer dans le référentiel héliocentrique galiléen.

3. On applique la deuxième loi de Newton à Vénus :

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}_{S/V}$$

$$\text{donc } M_V \cdot d\vec{v}_V/dt = \frac{G \cdot M_S \cdot M_V}{d_{SV}^2} \cdot \vec{u}_{VS}$$

$$\text{donc } \vec{a}_V = \frac{G \cdot M_S}{d_{SV}^2} \cdot \vec{u}_{VS}.$$

4. On a $a_V = \frac{G \cdot M_S}{d_{SV}^2} = \frac{v_V^2}{d_{SV}}$ (car le mouvement est uniforme), donc $v_V = \sqrt{\frac{G \cdot M_S}{d_{SV}}}$.

$$\text{Donc } v_V = \sqrt{\frac{6,6 \times 10^{-11} \times 2,0 \times 10^{30}}{1,0 \times 10^{11}}} = 3,6 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

5. a. L'orbite de Vénus est un cercle de rayon d_{SV} , donc la distance parcourue pendant la durée T_V est la circonférence du cercle $2\pi \cdot d_{SV}$ donc :

$$T_V = \frac{2\pi \cdot d_{SV}}{v_V} = \frac{2\pi \times 1,0 \times 10^{11}}{3,6 \times 10^4} = 1,7 \times 10^7 \text{ s}.$$

$$\text{Donc } T_V = \frac{1,7 \times 10^7}{24 \times 3600} = 2,0 \times 10^2 \text{ j}.$$

b. On a $T_V < 243$ jours, donc la période de révolution de Vénus est bien inférieure à sa période de rotation.

22 A. 1. a. Avant le tir, le système (S) est un système pseudo-isolé car les actions mécaniques extérieures qui s'exercent sur lui se compensent.

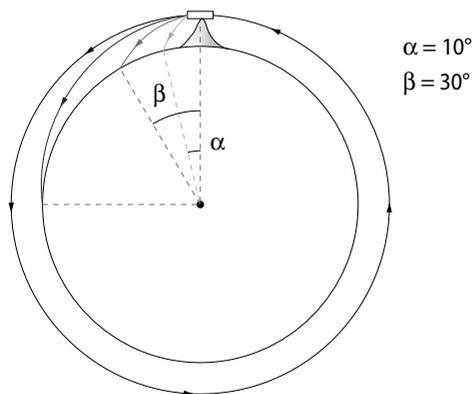
b. On a $\vec{p}_{\text{avant}}(S) = m_S \cdot \vec{0} = \vec{0}$.

2. On a $\vec{p}_{\text{après}}(S) = \vec{p}_{\text{après}}(\text{canon}) + \vec{p}_{\text{après}}(\text{boulet})$. Comme le système (S) est pseudo-isolé, sa quantité de mouvement se conserve, on a donc $\vec{p}_{\text{avant}}(S) = \vec{p}_{\text{après}}(S)$ donc $\vec{0} = \vec{p}_{\text{après}}(\text{canon}) + \vec{p}_{\text{après}}(\text{boulet})$ et donc finalement $\vec{p}_{\text{après}}(\text{canon}) = -\vec{p}_{\text{après}}(\text{boulet})$.

3. Le vecteur quantité de mouvement du canon après le tir est donc opposé à celui du boulet de canon. Comme le boulet de canon se déplace vers l'avant, le canon se déplace vers l'arrière : c'est le phénomène de recul du canon.

B. 1. Il n'y a qu'une action mécanique qui s'exerce sur le boulet au cours de son mouvement (puisqu'on néglige celle de l'air), elle est modélisée par la force de la Terre sur le boulet $\vec{F}_{T/B}$.

2.



3. Le boulet de canon est alors satellisé : il est en orbite circulaire autour de la Terre.

4. On a alors $r \approx R_T$ car on peut négliger la hauteur de la montagne (de l'ordre du km) par rapport au rayon de la Terre (plus de 6 000 km).

5. a. Troisième loi de Kepler : le rapport entre le carré de la période de révolution T du boulet de canon et le cube du rayon r de son orbite est constant, soit :

$$\frac{T^2}{r^3} = k \text{ avec } T \text{ en seconde (s), } r \text{ en mètre (m) et } k \text{ est une}$$

constante qui ne dépend que de l'astre attracteur : la Terre.

$k = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_T}$ avec G constante de gravitation universelle :

$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ et M_T masse de la Terre en kilogramme (kg).

b. D'après la troisième loi de Kepler, on a $\frac{T_B^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_T}$ avec $r = R_T$,

$$\text{donc } T_B = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{R_T^3}{G \cdot M_T}}.$$

$$\text{D'où } T_B = 2\pi \sqrt{\frac{(6,37 \times 10^6)^3}{6,67 \times 10^{-11} \times 5,98 \times 10^{24}}} = 5,06 \times 10^3 \text{ s}.$$

$$\text{Donc } T_B = \frac{5,06 \times 10^3}{3600} = 1,41 \text{ h}.$$

c. L'orbite du boulet de canon est un cercle de rayon r , donc la distance parcourue pendant la durée T_B est la circonférence du cercle $2\pi \cdot r$,

$$\text{donc } v = \frac{2\pi \cdot r}{T} \text{ avec } r = R_T.$$

$$\text{Donc } v_B = \frac{2\pi \cdot R_T}{T_B} = \frac{2\pi \times 6,37 \times 10^6}{5,06 \times 10^3} = 7,91 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

6. Sur l'image de l'énoncé, on voit qu'à partir de $8\,000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ le boulet de canon fait le tour de la Terre, la valeur de v_B trouvée est très proche de $8\,000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Il est indiqué également que le boulet fait un tour complet de la Terre en 1 h 23 min, or on a $T_B = 1,41 \text{ h} = 1 \text{ h } 25 \text{ min}$, ces deux valeurs sont également très proches.

EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

23 1. a. On a $r = r_p$ lorsque $\theta = 0$, donc $r_p = \frac{p}{1+e}$.

b. On a $r = r_A$ lorsque $\theta = 180^\circ$, donc $r_A = \frac{p}{1-e}$.

2. On a $r = p$ lorsque $\cos \theta = 0$, soit $\theta = 90^\circ$ ou $\theta = 270^\circ$.

3. a. D'après la troisième loi de Kepler, on a $\frac{T^2}{r^3} = k$ avec

T en seconde (s), r en mètre (m) et k est une constante qui ne dépend que de l'astre attracteur : la Terre.

Donc comme $r_2 > r_1$, on a $T_2 > T_1$.

b. On a donc $\frac{T_1^2}{r_1^3} = \frac{T_2^2}{r_2^3}$.

$$\text{Donc } \frac{T_2}{T_1} = \sqrt{\frac{r_2^3}{r_1^3}} = \sqrt{\left(\frac{800}{200}\right)^3} = 8,00.$$

4. a. Le centre de la Terre est un des deux foyers de l'ellipse correspondant à l'orbite de transfert.

b. D'après les schémas de l'énoncé, on a $r_p = r_1$ et $r_A = r_2$.

5. a. On trouve $p = 2 \times \frac{r_2 \cdot r_1}{r_2 + r_1}$ et $e = \frac{r_2 - r_1}{r_2 + r_1}$.

b. Donc $p = 2 \times \frac{800 \times 200}{800 + 200} = 320 \text{ km}$

$$\text{et } e = \frac{800 - 200}{800 + 200} = 0,600.$$

6. a. On a $2a = r_1 + r_2$. Donc $a = \frac{r_1 + r_2}{2}$.

b. $a = \frac{200 + 800}{2} = 500 \text{ km}$.

Travail d'une force

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
<ul style="list-style-type: none"> - Travail d'une force. - Force conservative. - Énergie potentielle. - Forces non conservatives : exemple des frottements. 	<ul style="list-style-type: none"> - Établir et exploiter les expressions du travail d'une force constante (force de pesanteur, force électrique dans le cas d'un champ uniforme). - Établir l'expression du travail d'une force de frottement d'intensité constante dans le cas d'une trajectoire rectiligne.

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Établir et exploiter l'expression du travail de la force électrique.
2. Établir et exploiter l'expression du travail de la force de pesanteur.
3. Établir l'expression du travail d'une force de frottement.

Évaluation diagnostique

p. 182

SITUATION 1

Il s'agit de vérifier que les élèves maîtrisent les notions d'actions et de forces vues en Seconde : les effets d'une action sur le mouvement d'un corps, sa modélisation par une force, les caractéristiques d'une force et sa représentation vectorielle.

Savoir distinguer droite d'action de la force exercée et direction du mouvement du receveur est également essentiel. Une force peut modifier le mouvement d'un corps même si elle ne s'exerce pas dans la direction du mouvement. Alors que la force pressante exercée par les skis sur la neige est normale à la surface pressée, la direction du mouvement sera donnée par celle du vecteur vitesse. L'**activité 1** permet découvrir les paramètres intervenant dans l'expression du travail d'une force constante lors d'un déplacement de son point d'application puis d'en proposer un modèle mathématique.

SITUATION 2

En s'appuyant sur les acquis de Première S (conservation ou non de l'énergie mécanique d'un système, frottements, énergie potentielle de pesanteur), il s'agit

ici d'amorcer une réflexion sur les transferts d'énergie lors du déplacement d'un skieur. L'énergie potentielle de pesanteur E_{pp} est une grandeur qui dépend de l'altitude z et de la masse m du solide étudié. Ainsi, lors de son ascension, l'énergie potentielle de pesanteur du skieur augmente progressivement grâce au travail fourni par le système de remontées mécaniques. L'énergie potentielle de pesanteur acquise par le skieur sera donc identique quel que soit le chemin suivi puisque les positions de départ et d'arrivée le sont. On peut donc supposer, qu'en l'absence de frottements, dissipatifs, le travail fourni par les remontées mécaniques sera le même. Le travail des forces de frottement, forces non conservatives, est abordé dans l'**activité 3** ; celui de la force de pesanteur, conservative, dans l'**activité 2**.

SITUATION 3

Un corps est dit en chute libre dans le champ de pesanteur terrestre lorsqu'il est uniquement soumis à l'action de son poids. Le terme *libre* est donc adapté lorsqu'il s'agit de situations dans lesquelles les actions de l'air (frottements et poussée d'Archimède) sont négligeables devant la valeur du poids du corps. Dans la situation proposée, le travail des frottements de l'air conduit à une conversion de l'énergie des poussières de comètes en énergie thermique par rayonnement et transfert de chaleur. Le travail des frottements n'est donc plus négligeable et le terme libre n'est pas justifié. L'**activité 3** reprend à travers deux autres exemples le travail des forces de frottement et montre qu'elles sont des forces non conservatives.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

Accélérateur de particules

p. 184

1. et 2. La saisie et le traitement des données (tracés de graphes, modélisation) pourront être assistés par ordinateur.

Constantes	AB = 15 m et $\alpha = 20^\circ$				
Grandeur testée	F (en N)				
	0	$1,0 \times 10^{-2}$	$2,5 \times 10^{-2}$	$5,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-1}$
Travail $W_{AB}(\vec{F})$ (en J)	0	$1,4 \times 10^{-1}$	$3,5 \times 10^{-1}$	$7,0 \times 10^{-1}$	1,4
Modèle	$W_{AB}(\vec{F}) = a_1 \cdot F$ $a_1 = 1,4 \times 10^1$ soit $a_2 = AB \cdot \cos \alpha$				

Constantes	$F = 5,0 \times 10^{-2}$ m et $\alpha = 20^\circ$				
Grandeur testée	AB (en m)				
	0	5,0	10	15	20
Travail $W_{AB}(\vec{F})$ (en J)	0	$2,3 \times 10^{-1}$	$4,7 \times 10^{-1}$	$7,0 \times 10^{-1}$	$9,4 \times 10^{-1}$
Modèle	$W_{AB}(\vec{F}) = a_2 \cdot AB$ $a_2 = 4,7 \times 10^{-2}$ soit $a_2 = F \cdot \cos \alpha$				

Constantes	$F = 5,0 \times 10^{-2}$ m et AB = 15 m				
Grandeur testée	α en degré et $\cos \alpha$				
	0°	20°	45°	90°	
	1	$9,4 \times 10^{-1}$	$7,1 \times 10^{-1}$	0	
Travail $W_{AB}(\vec{F})$ (en J)	$7,5 \times 10^{-1}$	$7,0 \times 10^{-1}$	$5,3 \times 10^{-1}$	0	
Modèle	$W_{AB}(\vec{F}) = a_3 \cdot \cos \alpha$ $a_3 = 7,5 \times 10^{-1}$ soit $a_3 = F \cdot AB$				

3. a. et b. Le travail d'une force dont le point d'application se déplace est d'autant plus important que :

- son intensité est grande ;
- le déplacement est long ;
- l'angle formé entre les vecteurs force \vec{F} et déplacement \vec{AB} est faible.

4. L'exploitation de l'expérience simulée amène l'expression $W_{AB}(\vec{F}) = F \cdot AB \cdot \cos \alpha$.

$W_{AB}(\vec{F})$ est le travail d'une force F constante, lors du déplacement rectiligne AB de son point d'application de A vers B.

$W_{AB}(\vec{F})$ s'exprime en Joule (J), F en Newton (N) et AB en mètre (m).

5. a. Si la direction de la force \vec{F} est perpendiculaire au déplacement, ou si son point d'application ne se déplace pas, alors la force ne travaille pas. Il ne suffit donc pas qu'il y ait déplacement du point d'application pour qu'une force travaille.

b. Le travail fourni est maximal lorsque les vecteurs force et déplacement sont colinéaires.

S'ils sont de même sens, le travail est moteur car la force favorise le déplacement. Dans le cas où ils sont de sens opposés, le travail est résistant car la force s'oppose au mouvement.

6. Dans le cas d'une force électrique \vec{F}_e :

$$W_{AB}(\vec{F}_e) = |q| \cdot E \cdot \ell \cdot \cos \alpha = |q| \cdot E \cdot \ell \text{ si } q > 0 \text{ et } \alpha = 0^\circ.$$

ACTIVITÉ 2

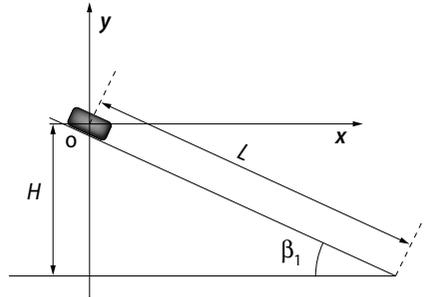
Hommes volants

p. 185

On partira ici des mesures suivantes : $m = 69,6$ g, $L = 139$ cm et $H = 17,9$ cm.

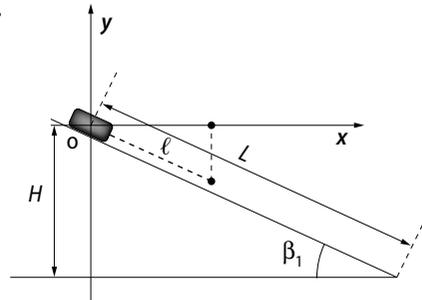
1. Le mobile décrit un mouvement rectiligne accéléré.

2. a.

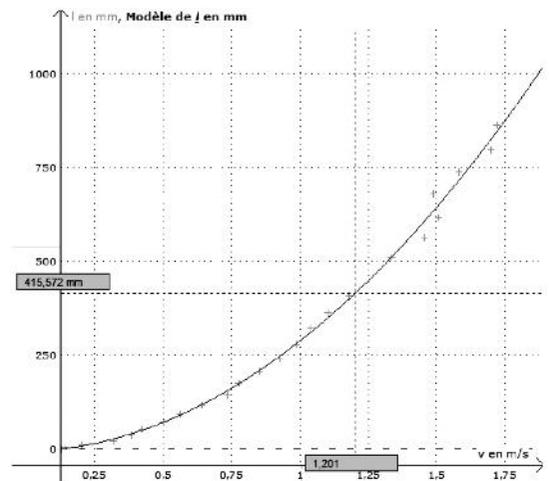


b. $\sin \beta_1 = H/L$ soit $\beta_1 = 7,40^\circ = 1,29 \times 10^{-1}$ rad.

3.

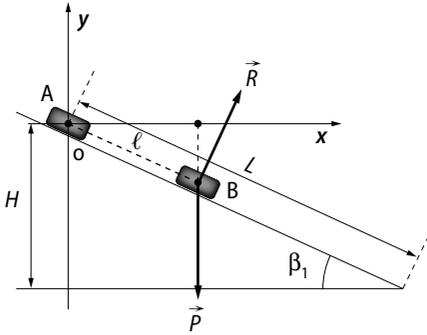


$$\ell^2 = x^2 + y^2 \text{ donc } \ell \text{ est donnée par } \ell = (x^2 + y^2)^{1/2}.$$



$$\ell_1 = 415 \text{ mm}$$

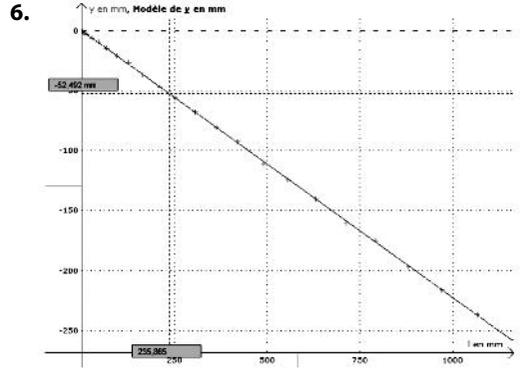
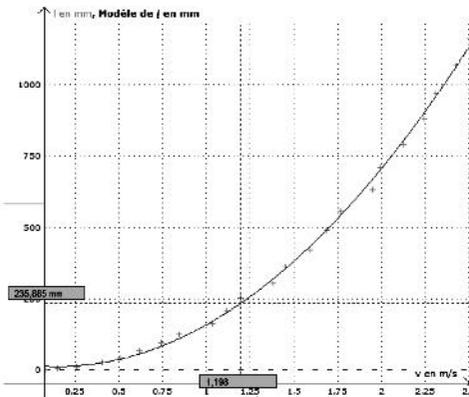
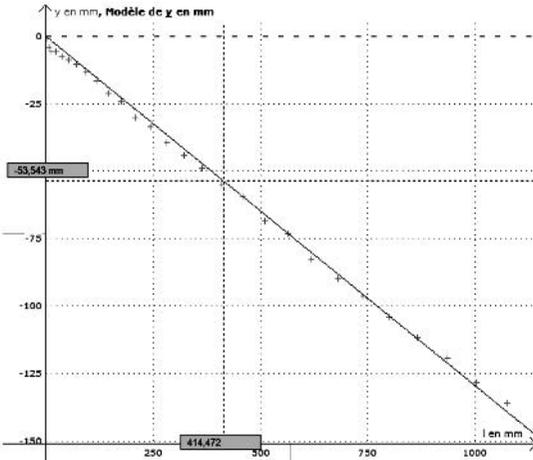
4. a. Étant situé dans le champ de pesanteur terrestre, le mobile est soumis à l'action de son poids \vec{P} (la force de pesanteur) et à la réaction \vec{R} du support. Les frottements étant négligeables, \vec{R} est normale au plan du support.



b. Pour un déplacement AB du centre d'inertie du mobile : $W_{AB}(\vec{P}) = \vec{P} \cdot \vec{AB} = m \cdot g \cdot \ell \cdot \cos(90 - \beta) = m \cdot g \cdot \ell \cdot \sin \beta$ et $W(R) = 0$ J car \vec{R} est perpendiculaire au déplacement \vec{AB} .

c. Pour un déplacement $\ell = \ell_1$: $W_1(\vec{P}) = 3,65 \times 10^{-2}$ J.

5. À partir du graphe $y = f(\ell)$, on constate $h_1 = 5,36$ cm.



Pour un angle $\beta_2 = 12,8^\circ = 2,23 \times 10^{-1}$ rad, $\ell_2 = 236$ mm, $W_2(\vec{P}) = 3,73 \times 10^{-2}$ J et $h_2 = 5,25$ cm.

Expérience	n° 1 (pente 12,8 %)	n° 2 (pente 22,1 %)
Angle	$\beta_1 = 7,4^\circ$	$\beta_2 = 12,8^\circ$
ℓ	$\ell_1 = 415$ mm	$\ell_2 = 236$ mm
h	$h_1 = 5,36$ cm	$h_2 = 5,25$ cm
W	$W_1(\vec{P}) = 3,65 \times 10^{-2}$ J	$W_2(\vec{P}) = 3,73 \times 10^{-2}$ J

En tenant compte des incertitudes liées aux mesures et au pointage, on constate que $W_1(\vec{P}) = W_2(\vec{P})$. De plus $h_1 = h_2$ mais en revanche $\ell_1 \neq \ell_2$ et $\beta_1 \neq \beta_2$.

7. a. Le travail de la force de pesanteur lors d'un déplacement entre deux points A et B est indépendant du chemin suivi (de sa longueur) pour aller de A vers B (on pourra faire remarquer que sur un déplacement horizontal, le travail de la force de pesanteur, verticale, est forcément nul).

b. $W_{AB}(\vec{P})$ dépend de la différence d'altitude entre les deux points du déplacement.

ACTIVITÉ 3

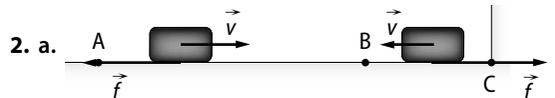
Un travail non négligeable

p. 186

1. a. Les actions mécaniques exercées par un fluide ou la surface d'un support sur un solide en déplacement sont évoqués dans le texte. La distinction est faite entre les frottements fluides lorsqu'un solide se déplace au sein d'un liquide ou d'un gaz, et les frottements de glissement lors de son déplacement sur un support solide.

b. Des forces de frottements présentent les deux caractéristiques suivantes : leur direction est celle du déplacement (donnée par la direction du vecteur vitesse) et leur sens est opposé à celui du vecteur vitesse.

c. Le travail fourni est résistant car ces forces s'opposent au mouvement, donc $W_{AB}(\vec{f}) < 0$.



2. a. Pour le déplacement direct de A en B :

$$W_{AB}(\vec{f}) = -f \cdot AB.$$

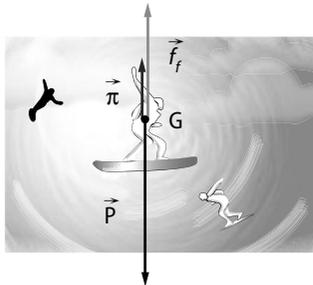
Pour le déplacement de A en B passant par C :

$$W_{AB}(\vec{f}) = \vec{f} \cdot \vec{AC} + \vec{f} \cdot \vec{CB} = -f \cdot AC - f \cdot CB = -f \cdot (AB + 2BC).$$

c. On constate que $W_{AB}(\vec{f})$ dépend du chemin suivi pour aller de A en B.

3. a. Le skysurfer est soumis à l'action de trois forces pendant sa chute verticale :

Caractéristiques	La force de pesanteur \vec{P}	La poussée d'Archimède $\vec{\Pi}$ due à l'air	Les frottements fluides \vec{f} dus à l'air atmosphérique
point d'application	centre de gravité G du skysurfer	centre de gravité G du skysurfer	centre de gravité G du skysurfer
direction	verticale	verticale	verticale
sens	vers la Terre	vers le haut	vers le haut
intensité	$P = m \cdot g$	$\Pi = \rho_{\text{air}} \cdot V_S \cdot g$	f



b. Dans le référentiel terrestre, considéré comme Galiléen, la première loi de Newton amène :

$$\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{\Pi} + \vec{f} + \vec{P} = \vec{0}.$$

$$\text{c. } W_{AB}(\vec{\Pi}) + W_{AB}(\vec{f}) + W_{AB}(\vec{P}) = \vec{\Pi} \cdot \vec{AB} + \vec{f} \cdot \vec{AB} + \vec{P} \cdot \vec{AB} = (\vec{\Pi} + \vec{f} + \vec{P}) \cdot \vec{AB}$$

$$W_{AB}(\vec{\Pi}) + W_{AB}(\vec{f}) + W_{AB}(\vec{P}) = \sum \vec{F}_{\text{ext}} \cdot \vec{AB} = \vec{0} \cdot \vec{AB} = 0.$$

$$W(\sum \vec{F}_{\text{ext}}) = 0.$$

$$\text{d. D'après 3. c., } W(\sum \vec{F}_{\text{ext}}) = \sum W(\vec{F}_{\text{ext}}) = 0.$$

$$W_{AB}(\vec{\Pi}) + W_{AB}(\vec{f}) + W_{AB}(\vec{P}) = 0 \text{ donc :}$$

$$W_{AB}(\vec{f}) = -W_{AB}(\vec{P}) - W_{AB}(\vec{\Pi}).$$

e. Le travail de la force de pesanteur est moteur :

$$W_{AB}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot (z_A - z_B) = 80 \times 9,8 \times (200 \times 50/3,6) = 2,2 \times 10^6 \text{ J.}$$

Le travail de la poussée d'Archimède est résistant :

$$W_{AB}(\vec{\Pi}) = -\rho_{\text{air}} \cdot V_S \cdot g \cdot (z_A - z_B) = -1,0 \times 3,0 \times 10^{-1} \times 9,81 \times (200 \times 50/3,6) = -8,2 \times 10^3 \text{ J.}$$

$$W_{AB}(\vec{f}) = -2,2 \times 10^6 \text{ J.}$$

$W_{AB}(\vec{f}) < 0$, ce qui est en accord avec la réponse donnée en 1.c.

4. Lors d'un déplacement de A en B de son point d'application, le travail d'une force de frottement \vec{f} constante et constamment opposée au mouvement a pour expression :

$$W_{AB}(\vec{f}) = \vec{f} \cdot \vec{AB} = f \cdot AB \cdot \cos 180^\circ = -f \cdot AB.$$

5. Le travail d'une force de frottement \vec{f} constante lors d'un déplacement de son point d'application de A en B dépend du chemin suivi pour aller de A en B : une force de frottement est non conservative.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : Établir et exploiter l'expression du travail de la force électrique

1. **1. Faux.** L'angle entre les vecteurs force et déplacement doit, de plus, être différent de 90° .

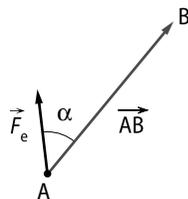
2. **Faux.** AB doit, de plus, être exprimé en mètre.

3. **Vrai.**

4. **Vrai.**

$$\text{2 1. a. } W_{AB}(\vec{F}_e) = \vec{F}_e \cdot \vec{AB} = F_e \cdot AB \cdot \cos \alpha.$$

b.



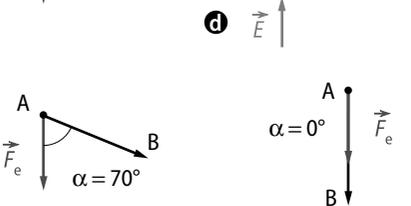
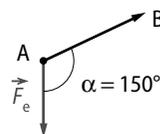
c. F_e est la valeur ou l'intensité de la force électrique en Newton (N), AB la longueur du déplacement en mètre (m) et α est l'angle entre les vecteurs \vec{F}_e et AB en degré ou radian. Le travail s'exprime en joule (J).

d. Les valeurs \vec{F}_e et \vec{AB} étant toujours positives, le signe du travail est celui du cosinus de l'angle α .

2.

Travail	moteur et maximal	résistant et maximal	moteur	résistant	nul
pour	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 180^\circ$	$0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$	$90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$	$\alpha = 90^\circ$ ou $AB = 0$
et	$W_{AB}(\vec{f}) > 0$	$W_{AB}(\vec{f}) < 0$	$W_{AB}(\vec{f}) > 0$	$W_{AB}(\vec{f}) < 0$	$W_{AB}(\vec{f}) = 0$
	$W_{AB}(\vec{f}) = F \cdot AB$	$W_{AB}(\vec{f}) = -F \cdot AB$	$W_{AB}(\vec{f}) = F \cdot AB \cdot \cos \alpha$		

4 1.



$$\text{2. } W_{AB}(\vec{F}_e) = |q| \cdot E \cdot AB \cdot \cos \alpha \text{ avec } q = -e.$$

3. Dans les cas a, c et d : la force électrique change de sens car la charge est désormais négative. L'angle α est donc modifié et devient $\alpha' = 180 - \alpha$.

4.	a	b	c	d
$W_{AB}(\vec{F}_e)$	$-1,1 \times 10^{-1} \text{ J}$	0 J	$4,3 \times 10^{-2} \text{ J}$	$1,2 \times 10^{-1} \text{ J}$
Travail	résistant	nul	moteur	moteur et maximal

5 1. a. $W(\vec{F}_e) = \vec{F}_e \cdot \vec{\ell} = Z \cdot e \cdot E \cdot \ell \cdot \cos \alpha$, où α est l'angle entre les vecteurs \vec{F}_e et $\vec{\ell}$.

b. Le travail étant moteur et maximal alors nécessairement \vec{F}_e et $\vec{\ell}$ sont colinéaires et de même sens ($\alpha = 0^\circ$).

c. $W_{AB}(\vec{F}_e) = 6,4 \times 10^{-14} \text{ J}$.

2. a. $U = E \cdot \ell = 200 \text{ kV}$.

b. L'énergie acquise par un noyau (de charge $2e$) accéléré sous une tension $U = 200 \text{ kV}$ est 400 keV .

c. $400 \text{ keV} = 400 \times 10^3 \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ J} = 6,4 \times 10^{-14} \text{ J}$.

3. a. On constate que $W_{AB}(\vec{F}_e) = \vec{F}_e \cdot \vec{AB} = q \cdot U_{AB}$.

b. Le travail d'une force électrique constante exercée sur une particule lors d'un déplacement entre deux points A et B dépend uniquement de la charge de la particule et de la tension électrique entre les deux points.

COMPÉTENCE 2 : Établir et exploiter l'expression du travail de la force de pesanteur

6 1. c et d.

2. a.

8 1. a. G.W. Leibniz est un philosophe et savant allemand du XVII^e siècle (1646-1716).

b. Aune : ancienne unité de longueur surtout utilisée pour les étoffes, 1 aune = 1,20 m.

Livre : ancienne unité de masse équivalent à 453,6 g.

2. a. Le travail d'une force constante.

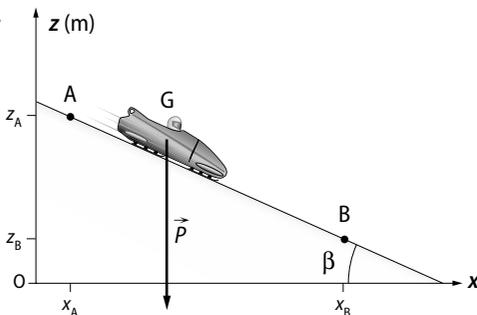
b. L'angle entre la direction de la force de pesanteur et celle du déplacement doit être nul.

c. Soit h la hauteur de chute et m la masse du corps, alors $W(\vec{P}) = m \cdot g \cdot h$ avec $g = 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$.

d. Dans le 1^{er} cas : $h = 4 \times 1,20 \text{ m}$ et $m = 453,6 \text{ g}$ donc $W_1(\vec{P}) = 21,4 \text{ J}$.

Dans le 2nd cas : $h = 1,20 \text{ m}$ et $m = 4 \times 453,6 \text{ g}$ donc $W_2(\vec{P}) = 21,4 \text{ J}$.

9 1.



2. a. $\alpha = 90^\circ - \beta$.

b. $W_{AB}(\vec{P}) = P \cdot AB \cdot \cos \alpha = m \cdot g \cdot AB \cdot \sin \beta$.

c. $W_{AB}(\vec{P}) = 1,83 \times 10^5 \text{ J}$.

d. Le travail fourni est moteur car sa valeur est positive.

3. a. $AH = AB \cdot \cos \alpha$ et $AH = (z_A - z_B)$.

b. $W_{AB}(\vec{P}) = P \cdot AB \cdot \cos \alpha$ donc $W_{AB}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot (z_A - z_B)$.

c. $W_{AB}(\vec{P}) = 1,83 \times 10^5 \text{ J}$.

4. $W_{AB}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot (z_A - z_B)$ car elle ne fait pas intervenir AB.

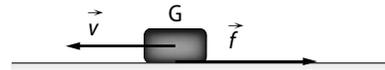
COMPÉTENCE 3 : Établir l'expression d'une force de frottement constante

10 1. b et c.

2. a. et d.

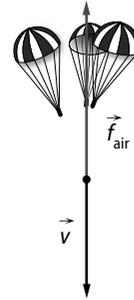
3. a.

11 1.



2. $W_\ell(\vec{f}) = -f \cdot \ell = 3,0 \times 2,50 = -7,5 \text{ J}$ car l'angle entre les deux vecteurs vaut 180° .

12 1.



2. a. Le travail est résistant et maximal car la force est colinéaire et opposée au vecteur vitesse : elle s'oppose au mouvement.

b. $W_{AB}(\vec{f}_{\text{air}}) = -f_{\text{air}} \cdot AB$.

3. a. Soit Δt la durée la chute.

$AB = v \cdot \Delta t = (35/3,6) \times 60 = 583 \text{ m} = 5,8 \times 10^2 \text{ m}$.

b. $W_{AB}(\vec{f}_{\text{air}}) = -f_{\text{air}} \cdot AB = -f_{\text{air}} \cdot v \cdot \Delta t$.

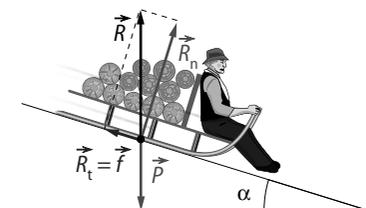
c. $W_{AB}(\vec{f}_{\text{air}}) = -2,3 \times 10^3 \times (35/3,6) \times 60 = -1,3 \times 10^6 \text{ J} = -1,3 \text{ MJ}$.

La valeur du travail est bien négative.

13 1. a. Le mouvement étant rectiligne uniforme, on a :

$$\vec{R} = -\vec{P}.$$

1. b et 2. a.



2. b. C'est la composante normale \vec{R}_n .
 \vec{R}_t est la force de frottement \vec{f} due au support.

3. a. $W_\ell(\vec{R}) = R \cdot \ell \cdot \cos(90^\circ - \alpha)$.

b. $W_\ell(\vec{R}_n) = R_n \cdot \ell \cdot \cos(90^\circ) = 0$.

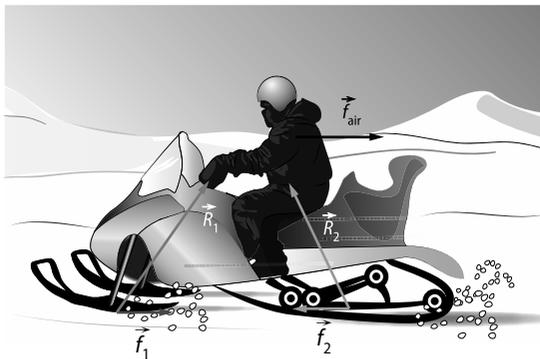
c. $W_\ell(\vec{f}) = f \cdot \ell \cdot \cos(180^\circ) = -f \cdot \ell$.

4. a. $W_\ell(\vec{R}) = W_\ell(\vec{R}_n) + W_\ell(\vec{f}) = W_\ell(\vec{f})$.

Le travail de la réaction du support se réduit au travail de la force de frottement.

b. En l'absence de frottement, la réaction d'un support ne travaille pas.

14 1.



2. a. $W(\vec{f}_2)$ est positif alors que $W(\vec{f}_1)$ et $W(\vec{f}_{\text{air}})$ sont négatifs.

La force \vec{f}_2 est exercée dans la même direction et dans le même sens que le déplacement.

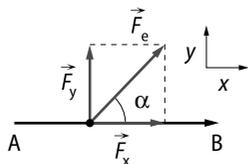
b. \vec{f}_2 est la seule composante de \vec{R}_2 qui fournit un travail. Ce travail est moteur.

3. Le point d'application de la force ne se déplace pas : le travail est nul.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

15 1. $W_{AB}(\vec{F}_e) = F_e \cdot AB \cdot \cos \alpha$.

2. a.



b. $F_x = F_e \cdot \cos \alpha$ et $F_y = F_e \cdot \sin \alpha$.

c. La composante \vec{F}_x favorise le mouvement car elle s'exerce dans la direction et dans le même sens que ceux du mouvement. \vec{F}_y n'a aucun effet sur le mouvement car s'exerce perpendiculairement au déplacement.

d. $W_{AB}(\vec{F}_x) = \vec{F}_x \cdot \vec{AB} = F_x \cdot AB = F_e \cdot AB \cdot \cos \alpha$
 et $W_{AB}(\vec{F}_y) = \vec{F}_y \cdot \vec{AB} = 0$.

3. $W_{AB}(\vec{F}_e) = W_{AB}(\vec{F}_x) + W_{AB}(\vec{F}_y) = W_{AB}(\vec{F}_x)$.

Le travail d'une force \vec{F} lors du déplacement de son point d'application est égal à la somme des travaux de ses composantes \vec{F}_x et \vec{F}_y et se réduit au travail de la composante tangentielle \vec{F}_x au déplacement.

$W_{AB}(\vec{F}_e) = F_x \cdot AB$ et $F_x = F_e \cdot \cos \alpha$ donc :

$W_{AB}(\vec{F}_e) = F_e \cdot AB \cdot \cos \alpha$.

16 Un vol en parapente

Un parapentiste s'élanche du sommet du Puy Mary à l'altitude $z_1 = 1\,520\text{ m}$ pour un vol d'un dénivelé $h = 506\text{ m}$. La masse du parapentiste et de son matériel vaut $m = 82,5\text{ kg}$.

1. Donner l'expression du travail de la force de pesanteur en fonction des données de l'énoncé. Calculer sa valeur. Soit z_2 l'altitude du point d'arrivée.

$W(\vec{P}) = m \cdot g \cdot (z_1 - z_2) = m \cdot g \cdot h$.

$W(\vec{P}) = 4,10 \times 10^5\text{ J}$.

Au cours de son vol, emporté par un courant atmosphérique ascendant, le parapentiste atteint une altitude $z = 1\,753\text{ m}$.

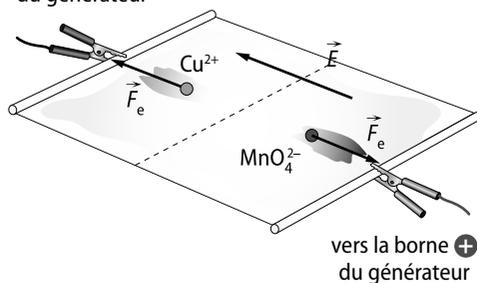
2. a. Le travail de la force de pesanteur au cours de ce déplacement en est-il modifié ? Justifier la réponse.

La réponse est identique. Le travail de la force de pesanteur lors du déplacement de son point d'application entre deux points dépend de la différence d'altitude entre ces deux points.

b. La même réponse est-elle transposable au travail des forces de frottement dues à l'air ?

La réponse n'est pas transposable au travail d'une force de frottement car sa valeur dépend du chemin suivi par le point d'application.

17 1. vers la borne \ominus du générateur



2. a. E s'exprime en $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$, U_{AB} en V et $d = AB$ en m. On en déduit $E = U_{AB}/AB$. D'où $E = 2,0 \times 10^2\text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$.

b. Pour chaque ion, le vecteur déplacement (\vec{CA} ou \vec{CB}) et le vecteur force électrique \vec{F}_e sont colinéaires et de même sens. De plus, $CA = CB = AB/2$, donc le travail de la force électrique s'écrit :

$W_{CA}(\vec{F}_e) = W_{CB}(\vec{F}_e) = |q| \cdot E \cdot CB \cdot \cos \alpha = |q| \cdot E \cdot AB/2$.

c. Avec $|q| = 2\text{ e}$, $W_{CA}(\vec{F}_e) = W_{CB}(\vec{F}_e) = 3,2 \times 10^{-18}\text{ J}$.

d. Le travail fourni est moteur dans les deux cas. Il favorise le mouvement.

3. Il s'agit d'un travail moteur dont la valeur vaut $W_{CB}(\vec{F}_e) = e \cdot E \cdot AB/2 = 1,6 \times 10^{-18} \text{ J}$.
Lors du déplacement d'une particule chargée, le travail de la force électrique exercée dépend de la charge électrique de la particule.

18 1. Le travail est résistant pour les déplacements AC_1 , C_2B et AB .

Le travail est nul pour C_1B et AC_2 .

2. a. $W_1(\vec{P}) = \vec{P} \cdot \vec{AC}_1 = -m \cdot g \cdot \ell$.

$W_2(\vec{P}) = \vec{P} \cdot \vec{C}_2B = -m \cdot g \cdot \ell$.

$W_3(\vec{P}) = \vec{P} \cdot \vec{AB} = -m \cdot g \cdot \sqrt{2} \cdot \ell \cdot \cos \alpha$ avec $\alpha = 45^\circ$.

b. $W_1(\vec{P}) = W_2(\vec{P}) = W_3(\vec{P}) = -2,21 \times 10^5 \text{ J}$.

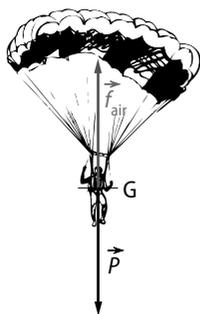
c. Il est indépendant du chemin suivi.

d. $W_{AB}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot (z_A - z_B)$.

3. a. $W_{BA}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot (z_B - z_A)$.

b. $W_{AA}(\vec{P}) = 0 \text{ J}$.

19 1. a.



b. Soit AB le déplacement du point d'application G .

Par définition $W_{AB}(\vec{P}) = \vec{P} \cdot \vec{AB} = m \cdot g \cdot (z_A - z_B)$.

Ici, $z_A - z_B = 800 \text{ m}$, donc :

$$W_{AB}(\vec{P}) = 75 \times 9,81 \times 800 = 5,9 \times 10^5 \text{ J}$$

c. Dans le référentiel terrestre, considéré comme galiléen, la première loi de Newton permet d'écrire : $\vec{f}_{\text{air}} = -\vec{P}$, où \vec{f}_{air} désigne les forces de frottement de l'air.

$$W_{AB}(\vec{f}_{\text{air}}) = \vec{f}_{\text{air}} \cdot \vec{AB} = -\vec{P} \cdot \vec{AB} = -W_{AB}(\vec{P})$$

$$W_{AB}(\vec{f}_{\text{air}}) = -5,9 \times 10^5 \text{ J}$$

2. Le mouvement n'étant pas rectiligne uniforme, on ne peut pas appliquer la première loi de Newton.

20 1. a. Le fait que la vitesse est constante permet de l'affirmer. En effet, la résultante des forces exercées sur le skieur est nulle, ce qui n'est possible ici qu'en présence de frottement.

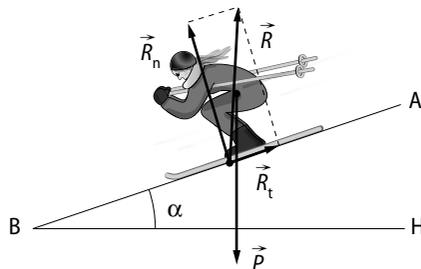
b. Le skieur est soumis à l'action des deux forces \vec{P} et \vec{R} , et il se déplace à vitesse constante.

Dans le référentiel terrestre considéré comme Galiléen, la première loi de Newton permet d'écrire :

$$\vec{P} + \vec{R} = \vec{0} \text{ donc } \vec{P} = -\vec{R} \text{ et } P = R$$

c. $R = P = m \cdot g = 7,11 \times 10^2 \text{ N}$.

Échelle : 1 cm pour $3,5 \times 10^2 \text{ N}$.



2. a. $W_{AB}(\vec{P}) = \vec{P} \cdot \vec{AB} = m \cdot g \cdot (z_A - z_B)$ où

$$(z_A - z_B) = AH = AB \cdot \sin \alpha$$

ou encore $\cos(\vec{P} \cdot \vec{AB}) = \cos(90^\circ - \alpha) = \sin \alpha$.

$$W_{AB}(\vec{P}) = 40 \times 9,81 \times 740 \times \sin 48,6^\circ = 3,95 \times 10^5 \text{ J}$$

b. La relation établie en 1. b. permet d'écrire :

$$W_{AB}(\vec{P}) + W_{AB}(\vec{R}) = 0, \text{ soit } W_{AB}(\vec{P}) = -W_{AB}(\vec{R})$$

$$W_{AB}(\vec{R}) = -3,95 \times 10^5 \text{ J}$$

3. a. Voir ci-dessus.

b. La composante tangentielle \vec{R}_t représente la force de frottement \vec{f} de la piste.

c. Par projection de la relation $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$ suivant la ligne de plus grande pente de la piste, on obtient :

$$f - P \cdot \sin \alpha = 0 \text{ soit } f = P \cdot \sin \alpha$$

$$W_{AB}(\vec{f}) = -f \cdot AB = -P \cdot \sin \alpha \cdot AB = -3,95 \times 10^5 \text{ J}$$

$$d. W_{AB}(\vec{f}) = W_{AB}(\vec{R}) = -W_{AB}(\vec{P})$$

La composante \vec{R}_n étant perpendiculaire au déplacement, $W_{AB}(\vec{R}_n) = 0$, donc :

$$W_{AB}(\vec{R}) = W_{AB}(\vec{R}_n) + W_{AB}(\vec{R}_t) = W_{AB}(\vec{R}_t) = W_{AB}(\vec{f})$$

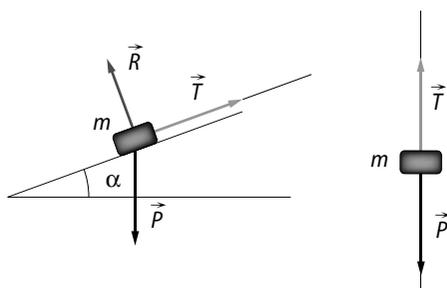
Le résultat était donc prévisible.

Lors du déplacement d'un solide sur un support, le travail de la force exercée par le support sur le solide se réduit au travail de sa composante tangentielle, c'est-à-dire au travail de la force de frottement.

21 1.

hypothèse a

hypothèse b



2. a. Hypothèse a : $T_1 = P \cdot \sin \alpha$; Hypothèse b : $T_2 = P$.

b. $T_1 = 10,4 \text{ kN}$, soit la force exercée par 12 hommes.

$T_2 = 24,5 \text{ kN}$, soit celle exercée par 28 hommes.

3. Hypothèse 1 : $W(\vec{R}) = 0 \text{ J}$; $W(\vec{P}) = -m \cdot g \cdot h$;

$$W(\vec{T}_1) = T_1 \cdot h / \sin \alpha = 4,9 \times 10^5 \text{ J}$$

Hypothèse 2 : $W(\vec{P}) = -m \cdot g \cdot h$; $W(\vec{T}_2) = T_2 \cdot h = 4,9 \times 10^5 \text{ J}$.

On constate que $W(\vec{T}_2) = W(\vec{T}_1)$ est aussi égal à :

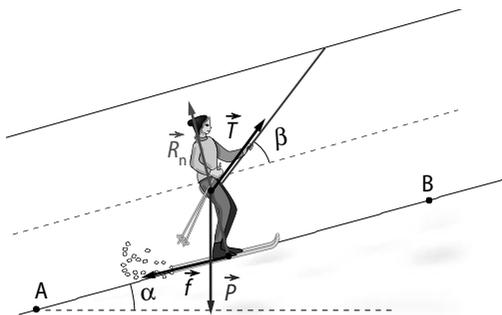
$$(-W(\vec{P})) = m \cdot g \cdot h$$

4. a. La valeur de la force de traction à fournir est plus faible avec la première technique mais doit être exercée sur une distance importante. La seconde technique nécessite quant à elle une force plus grande mais exercée sur un déplacement plus court.

b. Pas vraiment car le travail à fournir est identique quelle que soit la technique utilisée.

c. D'après l'hypothèse d'un architecte, J.-C. Houdin, un couloir interne construit juste sous la surface de la pyramide aurait permis de monter les blocs de pierre jusqu'au sommet.

22 1. a. Le skieur est soumis à l'action de la force de pesanteur \vec{P} , à la force de traction \vec{T} , à la réaction \vec{R}_n de la piste décomposable en une réaction normale \vec{R}_n à la piste et une force de frottement \vec{f} .



b. Dans le référentiel terrestre considéré comme galiléen, l'application de la première loi de Newton amène :

$$\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{0}.$$

c. $W_{AB}(\sum \vec{F}_{\text{ext}}) = \sum \vec{F}_{\text{ext}} \cdot \vec{AB} = 0.$

2. \vec{T} fournit un travail moteur, \vec{R}_n ne travaille pas, \vec{f} et \vec{P} fournissent un travail résistant.

3. a. En notant A le bas de la piste, B le sommet, on a :

$$z_A - z_B = -L \cdot \sin \alpha = -112 \text{ m}.$$

b. $W_{AB}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot (z_A - z_B) = -9,43 \times 10^4 \text{ J}.$

$$W_{AB}(\vec{T}) = T \cdot AB \cdot \cos \beta = 1,12 \times 10^5 \text{ J}.$$

$$W_{AB}(\sum \vec{F}_{\text{ext}}) = \sum W_{AB}(\vec{F}_{\text{ext}})$$

$$= W_{AB}(\vec{P}) + W_{AB}(\vec{T}) + W_{AB}(\vec{f}) = 0.$$

$$W_{AB}(\vec{f}) = -W_{AB}(\vec{P}) - W_{AB}(\vec{T}) = -1,75 \times 10^4 \text{ J}.$$

c. $W_{AB}(\vec{f}) = -f \cdot L$, donc $f = 58,2 \text{ N}.$

23 1. a. $W(\vec{P}) = m \cdot g \cdot (z_0 - z)$. Or $z_0 = -\ell \cdot \cos \alpha_0$ et $z = -\ell \cdot \cos \alpha$ donc $W(\vec{P}) = m \cdot g \cdot \ell \cdot (\cos \alpha - \cos \alpha_0).$

b. $\alpha < \alpha_0$ donc $\cos \alpha > \cos \alpha_0$ et $W(\vec{P}) > 0$: le travail est moteur.

c. $W(\vec{P}) = m \cdot g \cdot \ell \cdot (1 - \cos \alpha_0) = 2,30 \times 10^{-1} \text{ J}.$

2. a. $W(\vec{P}) = m \cdot g \cdot \ell \cdot (\cos \alpha_0 - 1) = -2,30 \times 10^{-1} \text{ J}.$

b. Le travail est nul.

3. À chaque instant, cette force est perpendiculaire au déplacement de son point d'application. Elle ne travaille pas.

24 1. $v_B = \ell / \Delta t$, soit :

$$v_B = 5,0 \times 10^{-2} / (35,7 \times 10^{-3}) = 1,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$\Delta E_C = E_{C(B)} - E_{C(A)} = 1/2 \cdot m \cdot (v_B^2 - v_A^2)$$

$$\Delta E_C = -2,2 \times 10^{-1} \text{ J}.$$

2. $z_A - z_B = -L \cdot \sin \alpha.$

Donc $W_{AB}(\vec{P}) = -m \cdot g \cdot L \cdot \sin \alpha$

$$W_{AB}(\vec{P}) = -2,2 \times 10^{-1} \text{ J}.$$

3. a. On constate que $W_{AB}(\vec{P}) = \Delta E_C.$

b. Les forces de frottement ne travaillent pas.

25 1. $E_{ppA} = m \cdot g \cdot h = 1,10 \times 10^4 \text{ J}.$

2. a. Sans frottement, il y a transformation d'énergie potentielle de pesanteur en énergie cinétique.

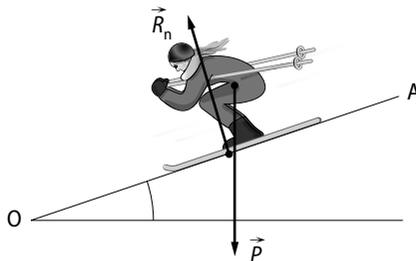
$$E_{cO} = E_{ppA} = 1,10 \times 10^4 \text{ J} \text{ donc :}$$

$$v_O = 17,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 61,8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}.$$

b. $\Delta E_C = E_{cO} - E_{cA} = 1,10 \times 10^4 \text{ J}.$

c. $E_m = E_c + E_p$ se conserve car le mobile n'est soumis à aucun frottement.

3. a. Le snowboarder est soumis à l'action de la force de pesanteur \vec{P} et à la réaction \vec{R}_n de la piste décomposable en une réaction normale \vec{R}_n unique.



b. $W_{AB}(\vec{R}_n) = 0$ et $W_{AB}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot h = 1,10 \times 10^4 \text{ J}.$

c. $W_{AB}(\vec{P}) = -\Delta E_{pp}.$

d. $W_{AB}(\vec{P}) + W_{AB}(\vec{R}_n) = \sum W_{AB}(\vec{F}_{\text{ext}}) = 1,10 \times 10^4 \text{ J} = \Delta E_C.$

La variation d'énergie cinétique du snowboarder en translation entre deux points A et B est égale à la somme des travaux des forces extérieures qui lui sont appliquées entre ces deux points. Un travail traduit donc une variation d'énergie.

4. a. E_m ne se conserve pas mais diminue.

b. $\Delta E_m = \Delta E_{pp} + \Delta E_c$ et ΔE_{pp} reste la même que précédemment donc ΔE_c est plus faible.

5. a. $\sum W_{AB}(\vec{F}_{\text{ext}}) = W_{AB}(\vec{P}) + W_{AB}(\vec{R}_n) + W_{AB}(\vec{f}) = \Delta E_c$ donc :

$$W_{AB}(\vec{f}) = \Delta E_c - W_{AB}(\vec{P}).$$

b. $W_{AB}(\vec{f}) = 1/2 \cdot m \cdot v^2 - m \cdot g \cdot h$ donc :

$$W_{AB}(\vec{f}) = -6,37 \times 10^3 \text{ J}.$$

6. $\Delta E_m = \Delta E_{pp} + \Delta E_c = -1,10 \times 10^4 + 4,63 \times 10^3$

$$= -6,37 \times 10^3 \text{ J} = W_{AB}(\vec{f}).$$

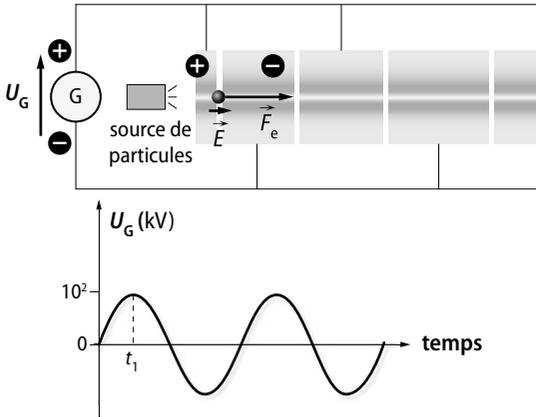
7. L'énergie mécanique d'un solide se conserve lorsqu'aucune force extérieure autre que le poids ne

travaille. Lorsque d'autres forces extérieures travaillent, la variation d'énergie mécanique est égale à la somme des travaux des forces extérieures autres que le poids.

EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

26 1. Il permet que deux tubes successifs soient toujours à des potentiels de signe opposé.

2. a. et c.



b. Le tube 1 doit porter un potentiel positif, le tube 2 un potentiel négatif.

3. a. Voir sur le schéma.

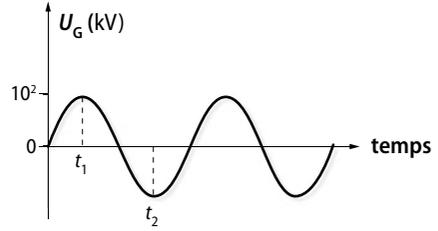
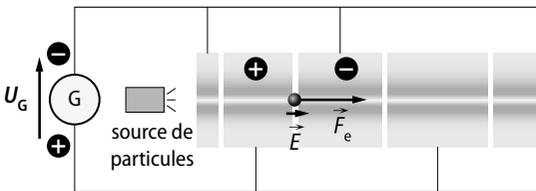
b. $E = U_G/L = 1,0 \times 10^5 / (2,0 \times 10^{-2}) = 5,0 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$
 et $F_e = e \cdot E = 8,0 \times 10^{-13} \text{ N}$.

c. La vitesse de la particule est orientée selon l'axe des tubes et présente donc le même sens que :

$$\vec{F}_e \cdot W(\vec{F}_e) = F_e \cdot L = 1,6 \times 10^{-14} \text{ J}.$$

d. $\Delta E_c = W(\vec{F}_e)$. Or la vitesse initiale est négligeable, donc $E_c = 1/2 \cdot m \cdot v^2 = F_e \cdot L$, soit $v = \sqrt{(2 \cdot F_e \cdot L/m)}$.
 $v = 4,4 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

4. a. et b.



c. La durée de vol $\Delta t = T/2 = 1/(2f) = 2,0 \times 10^{-8} \text{ s}$.

d. La longueur du premier tube est donc :

$$d = v \cdot T/2 = 8,8 \times 10^{-2} \text{ m} = 8,8 \text{ cm}.$$

5. a. Lors de son passage dans les cavités accélératrices successives, la vitesse v de la particule augmente sous l'action du travail de la force électrique. En revanche, la période T du signal produit par le générateur restant constante, il faut alors allonger les tubes pour que l'accélération reste efficace.

b. Le travail de la force électrique exercée sur le proton dans chaque cavité s'écrit :

$$W(\vec{F}_e) = F_e \cdot L = q \cdot E \cdot L = e \cdot U_G \cdot L/L = e \cdot U_G.$$

Pour n cavités, il vaut donc $n \cdot e \cdot U_G$. Il s'agit de l'énergie cinétique acquise par le proton (voir réponse **3.d.**).

c. $E_c = 12 \times 1,6 \times 10^{-19} \times 1,0 \times 10^5 = 1,9 \times 10^{-13} \text{ J}$
 $= 1,2 \text{ MeV}$.

d. $v = \sqrt{(2E_c/m)} = 1,5 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, donc $v/c = 5,1 \%$.

Dans l'approximation de 12 premiers tubes de 50 cm de longueur en moyenne, la distance de l'accélérateur permettant d'accélérer un proton jusqu'à $c/20$ doit être supérieure à 6 m. Pour s'approcher davantage de la célérité de la lumière, le plus grand accélérateur à protons situé à Los Alamos (USA) est long de 800 m. Il permet d'obtenir des protons d'énergie égale à 8 MeV.

Le plus grand accélérateur linéaire mesure 3,2 km et est situé à l'Université de Stanford aux États-Unis. Il atteint d'ailleurs les 50 GeV pour les électrons.

6. a. Aucune car le travail de la force électrique ne dépend que de q et U_G .

b. Les particules ne seraient pas accélérées car la force électrique ne travaillerait pas. $U_G = 0 \text{ V}$ lors du passage de la particule d'un tube à l'autre.

Transferts énergétiques

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
<ul style="list-style-type: none"> – Mesures du temps et oscillateur, amortissement. – Énergie mécanique. – Étude énergétique des oscillations libres d'un système mécanique. – Dissipation d'énergie. 	<ul style="list-style-type: none"> – <i>Pratiquer une démarche expérimentale pour mettre en évidence :</i> <ul style="list-style-type: none"> • les différents paramètres influençant la période d'un oscillateur mécanique ; • son amortissement. – Analyser les transferts énergétiques au cours d'un mouvement d'un point matériel. – <i>Pratiquer une démarche expérimentale pour étudier l'évolution des énergies cinétique, potentielle et mécanique d'un oscillateur.</i>

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Analyser des transferts énergétiques au cours de mouvements.
2. Faire une étude énergétique d'un oscillateur.
3. Mettre en évidence l'amortissement et la dissipation d'énergie.

Évaluation diagnostique

p. 198

SITUATION 1

Cette situation permet d'effectuer un retour sur les différentes formes d'énergie caractérisant l'état d'un système mécanique abordées en Première S : l'énergie potentielle de pesanteur E_{pp} et l'énergie cinétique E_c . Les élèves doivent être capables de rappeler les paramètres dont dépendent ses deux formes d'énergie, de préciser que l' E_{pp} emmagasinée par le wagonnet sera maximale au sommet d'une montagne russe alors que son E_c le sera lorsqu'il aura atteint sa vitesse maximale. L'**activité 1** est une étude de documents historiques permettant une première approche des transferts entre ces deux formes d'énergie lors du mouvement d'un mobile.

SITUATION 2

La plupart des élèves supposent que la masse du trapéziste, l'angle de déviation initial choisi et la longueur du trapèze vont modifier la durée des oscillations. L'**activité 2** est une démarche d'investigation qui permet de vérifier les hypothèses des élèves sur ce problème. Cette situation est l'occasion d'effectuer un retour sur

les phénomènes périodiques, la définition d'une période ou encore la méthode permettant sa mesure avec une bonne précision abordées dès la classe de Seconde.

SITUATION 3

Cette situation permet de faire prendre conscience aux élèves :

- d'une part, que de multiples transferts entre les différentes formes d'énergie se produisent lors des oscillations d'un sauteur à l'élastique ;
- d'autre part, que ces transferts se produisent grâce au travail des forces mises en jeu (force de pesanteur, force de frottement, force exercée par l'élastique).

Les élèves pourront indiquer que l'énergie emmagasinée, avant le saut, sous forme potentielle de pesanteur est partiellement transférée, lors de la chute, sous forme cinétique grâce au travail du poids. Le travail des forces de frottements conduit à une dissipation de l'énergie du système vers le milieu extérieur.

On pourra faire remarquer que l'énergie cinétique acquise par le système entraîne ensuite une déformation de l'élastique. À son tour, l'élastique emmagasine de l'énergie. Cette situation est alors l'occasion d'introduire la notion d'énergie potentielle élastique, d'expliquer les termes *potentielle* et *élastique*. Le travail de la force (de rappel) exercée par le ressort sur le sauteur permet, lors de la remontée, un transfert d'énergie de la forme potentielle élastique vers la forme cinétique. L'**activité 3** est une activité expérimentale permettant de réaliser l'étude énergétique d'un oscillateur.

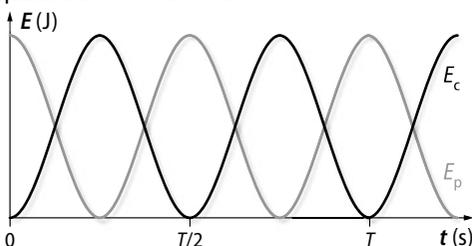
ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

Les pendules de Galilée

p. 200

1. a. « Allées et venues » et « vibrations » sont les termes employés pour désigner les oscillations du pendule.
 b. La période d'un pendule correspond à la durée d'un aller-retour.
 c. Mesurer la durée de plusieurs oscillations permet de déterminer la valeur d'une période avec une précision « satisfaisante ». (L'incertitude Δt sur la mesure de durée effectuée étant divisée par le nombre de périodes prises en compte.)
2. a. Galilée étudie l'influence de la masse du solide accroché au fil du pendule, de la longueur du fil. Il analyse également l'effet des frottements de l'air et l'effet de l'amplitude des oscillations.
 b. La masse du pendule n'a pas d'influence sur la période des oscillations tout comme l'amplitude des oscillations même si elle diminue lorsque les frottements de l'air augmentent. La longueur du fil est le seul paramètre d'influence : lorsque la longueur du fil est doublée, la période est multipliée par quatre.
3. a. T_3 et T_4 peuvent être éliminés car T est indépendante de la masse m du pendule.
 b. g , en $m \cdot s^{-2}$, est une accélération, quotient d'une vitesse par le temps $[g] = [v]/T = L/T^2$.
 $[T_1] = \sqrt{L/(L \cdot T^{-2})} = \sqrt{T^2} = T$.
 T_1 est homogène à une durée donc à une période.
4. $T = 2\pi \sqrt{(4 \times 0,573/9,81)} = 3,04 \text{ s}$.
5. a. Le pendule constitué de la boule de liège est le plus amorti. L'amortissement se traduit par une diminution plus importante de l'amplitude des oscillations et de la vitesse du pendule.
 b. Il est dû aux frottements de l'air.
6. a. Au départ (instant $t = 0 \text{ s}$), le pendule est lâché sans vitesse initiale : $E_c = 1/2 \cdot m \cdot v^2 = 0 \text{ J}$. Au cours du mouvement, son énergie cinétique augmente progressivement, atteint son maximum lors du passage par la position d'équilibre puis, diminue et s'annule à nouveau lorsque le pendule atteint l'amplitude maximale à $t = T/2$. Le mouvement du pendule change de sens entre $T/2$ et T . L'énergie potentielle de pesanteur dépend de la position du pendule. Elle est maximale à $t = 0 \text{ s}$, $t = T/2$ et $t = T$; elle est minimale lors du passage par la position d'équilibre à $t = T/4$ et $t = 3T/4$.



b. Le pendule est soumis à l'action de la Terre (son poids) et à l'action du fil (la tension du fil). À chaque instant du mouvement, cette dernière force est perpendiculaire au déplacement de son point d'application : elle ne travaille donc pas. Le poids est donc la seule force qui fournit un travail.

7. La période des oscillations d'un pendule simple dépend de la longueur du fil constituant le pendule et de l'intensité de la pesanteur du lieu. Elle est indépendante de la masse du solide et de l'amplitude des oscillations (dans le cas d'écart angulaires faibles).

8. Grâce au travail du poids, des transferts d'énergie se produisent lors des oscillations de pendule :
 – de la forme potentielle de pesanteur à la forme cinétique lorsque le pendule descend ;
 – de la forme cinétique à la forme potentielle lorsqu'il monte.

ACTIVITÉ 2

Période et amortissement d'un oscillateur mécanique

p. 201

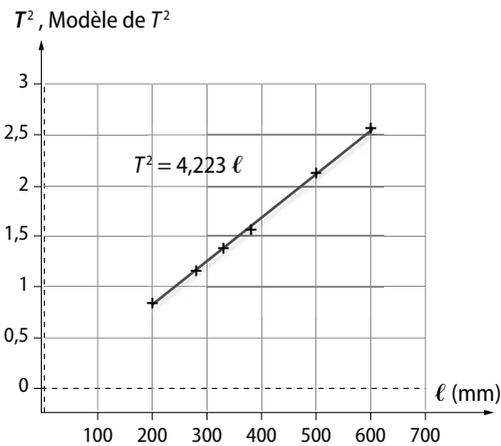
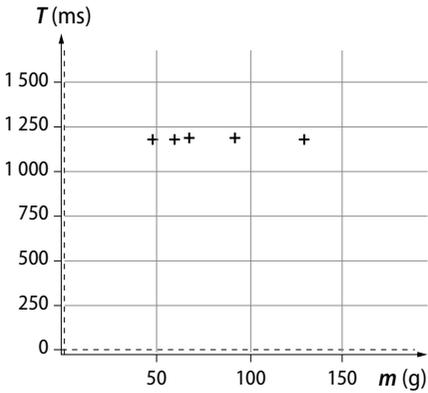
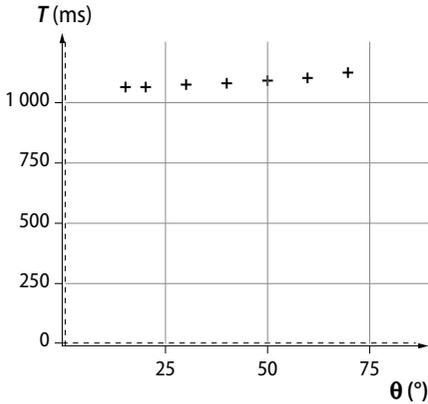
1. On mesurera la durée Δt d'un nombre suffisant de périodes (par exemple $\Delta t = 10T$) pour avoir une bonne précision.
2. a. On pourra par exemple tester la longueur ℓ du fil, la masse m du pendule, l'angle initial de déviation θ . Il convient, pour réaliser l'étude, de fixer les paramètres, de n'en modifier qu'un seul et de mesurer la période T du pendule.
 Pour l'influence de ℓ , on fixe m et θ , puis on modifie la longueur du fil. On pourra s'interroger sur le nombre de mesures qui permet raisonnablement de valider les observations.
 Pour l'influence de m , on fixe ℓ et θ , et on modifie la masse du pendule.
 Pour l'influence de θ , on fixe m et ℓ , et on modifie l'angle initial.
3. On pourra faire constater :
 – l'influence de ℓ : quand ℓ augmente, T augmente ;
 – l'influence de θ : pour des valeurs de θ faibles (inférieures à 40°), T est indépendant de θ ;
 – l'influence de m : T est indépendant de m .

$\ell = 28 \text{ cm et } m = 59,1 \text{ g}$							
θ (en $^\circ$)	15	20	30	40	50	60	70
T (en s)	1,069	1,069	1,079	1,081	1,092	1,105	1,127

$\ell = 33 \text{ cm et } \theta = 30^\circ$					
m (en g)	46,9	59,1	67,30	92,1	130
T (en s)	1,182	1,177	1,183	1,190	1,170

$\theta = 30^\circ$ et $m = 59,1 \text{ g}$						
ℓ (en cm)	20	33	38	50	60	28
T (en s)	0,916	1,177	1,253	1,457	1,600	1,081

On pourra tracer $T = f(m)$; $T = f(\theta)$, $T = f(\ell)$ et $T^2 = f(\ell)$.

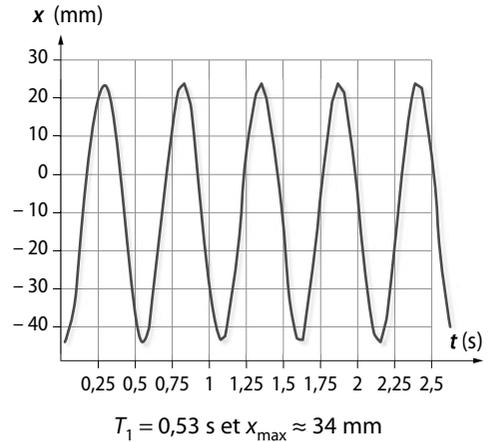


4. Il s'agit de filmer à la webcam les oscillations d'un pendule élastique vertical dans l'air, puis dans une éprouvette remplie d'eau (par exemple). On pourra augmenter la surface de contact du solide avec le fluide sans

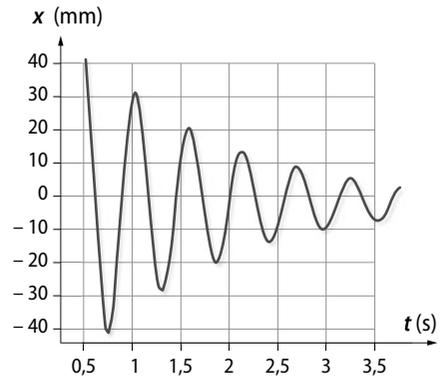
modifier sa masse ou encore ajouter des frottements de glissement entre les parois de l'éprouvette et le solide afin d'augmenter encore l'action des frottements. Les enregistrements seront ensuite traités à partir d'un tableur grapheur afin d'étudier l'évolution de l'amplitude et de la période des oscillations selon les différentes conditions d'oscillations.

$m = 100 \text{ g}$ et $k = 13,5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$.

5. Oscillations dans l'air



Oscillations dans l'eau



6. Si l'amplitude des oscillations ne dépasse pas une vingtaine de degrés, la période propre T_0 des oscillations est indépendante de leur amplitude. Elle est indépendante de masse du solide mais proportionnelle à la racine carrée de la longueur du fil.

7. a. Les oscillations sont d'autant plus amorties que les frottements sont plus importants. Par exemple, les frottements exercés par un fluide sur le solide immergé augmentent avec la viscosité du fluide.

b. Quand on augmente les frottements, l'amplitude et le nombre des oscillations du solide diminuent rapidement. Tant que l'amortissement est assez faible (cas d'un liquide peu visqueux), la période (nommée pseudo-période) est pratiquement égale à la période propre du système

non amorti. Les oscillations s'amortissent lentement et le régime des oscillations est dit pseudo-périodique. Si les frottements deviennent trop importants (cas d'un liquide très visqueux ou de frottements de glissement), les oscillations s'amortissent plus rapidement. Le solide, écarté de sa position d'équilibre, y retourne sans osciller : c'est le régime apériodique. Le régime critique correspond au régime apériodique pour lequel le système revient le plus rapidement possible à son état d'équilibre.

ACTIVITÉ 3

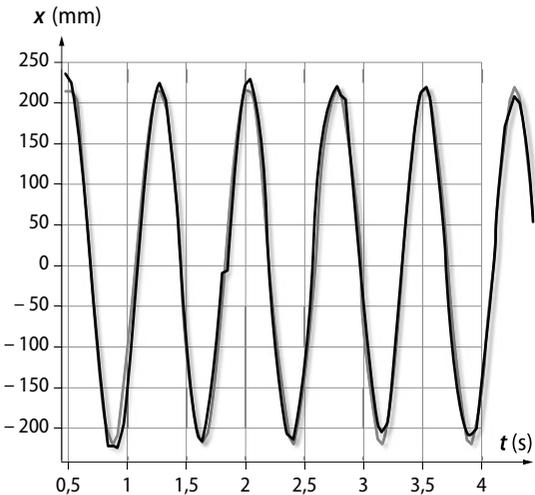
Se peser dans l'espace

p. 202

On prend ici les valeurs suivantes.

Masse m du mobile apparaissant sur la vidéo : $m = 77,0 \text{ g}$.

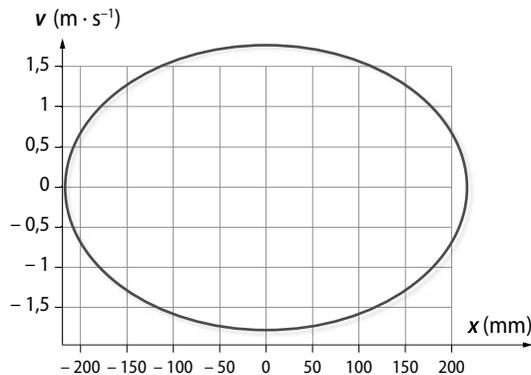
Constante de raideur k d'un ressort : $k = 2,5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$.



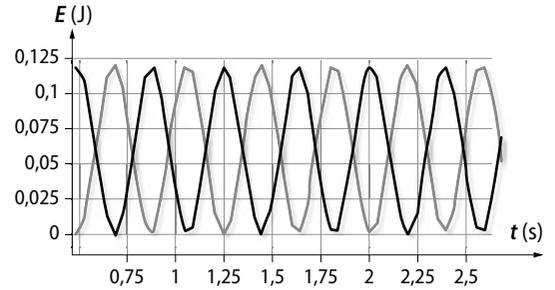
1. a. Le mobile oscille horizontalement autour d'une position d'équilibre en décrivant un mouvement de translation rectiligne.

b. $x_m = 218 \times 10^{-3} \text{ m}$ et $T = 7,5 \times 10^{-1} \text{ s}$.

c. $T \approx T_0 = 7,4 \times 10^{-1} \text{ s}$.



2. La vitesse est maximale ($v_G = 1,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) aux instants pour lesquels le mobile passe par sa position d'équilibre ($x_G = 0 \text{ m}$). Elle est nulle ($v_G = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) aux instants où il passe par l'une de ses positions extrêmes ($x_G = \pm x_m$).



3. a. Au départ, l'énergie du système est emmagasinée sous la forme potentielle élastique. E_{pe} est maximale et E_c minimale et nulle à $t_0 = 0,5 \text{ s}$.

À $t = t_0 + T/4 = 0,69 \text{ s}$, E_{pe} est minimale et nulle, et E_c maximale.

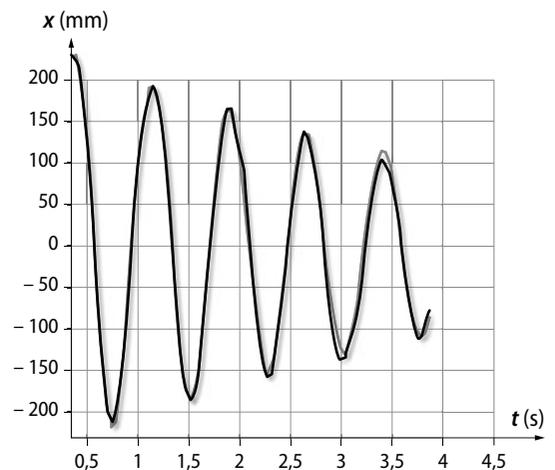
b. Au cours de la durée $\Delta t = T/4$, l'énergie cinétique du système augmente $\Delta E_c = +1,16 \times 10^{-1} \text{ J}$ alors que son énergie potentielle élastique diminue $\Delta E_{pe} = -1,16 \times 10^{-1} \text{ J}$. L'énergie mécanique se conserve : $\Delta E_m = 0 \text{ J}$.

c. Il y a transfert d'énergie potentielle élastique en énergie cinétique.

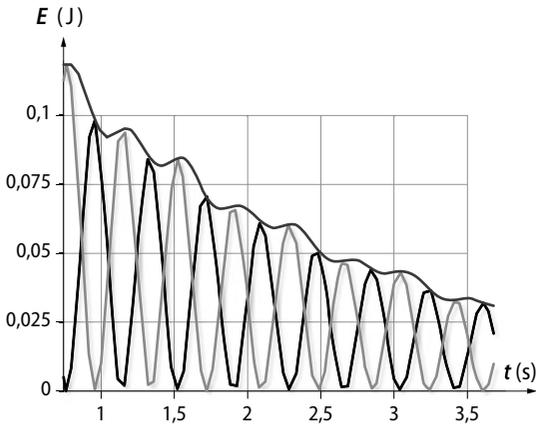
4. a. Entre les instants $t = T/4 = 0,69 \text{ s}$ et $t = T/2 = 0,87 \text{ s}$, il y a transfert d'énergie cinétique en énergie potentielle élastique.

b. L'énergie mécanique se conserve : $\Delta E_m = 0 \text{ J}$.

Évolution de l'élongation du centre d'inertie du mobile au cours du temps



Évolution des énergies cinétique, potentielle élastique et mécanique du mobile au cours du temps



5. a. La baisse de la soufflerie entraîne l'apparition de frottements non négligeables entre le mobile et le banc.
b. Les oscillations s'amortissent lentement et le régime des oscillations devient pseudo-périodique.

6. La mesure de la pseudo-période T des oscillations du système oscillant « siège + astronaute » permet de déterminer la masse m_2 de l'astronaute (la masse du siège m_1 et la constante de raideur k' des deux ressorts étant connus).

$$T \approx T_0 = 2\pi \cdot \sqrt{(m/k')} \text{ avec } m = m_1 + m_2 \text{ et } k = 2k'.$$

Remarque : dans le cas où k' n'est pas connu précisément, la mesure des périodes T_1 (oscillations du siège vide) et T_2 (oscillations de l'astronaute sur le siège) permettent de déterminer la masse m_2 de l'astronaute. $T_1 = 2\pi\sqrt{(m_1/k')}$ et $T_2 = 2\pi\sqrt{(m/k')}$ amènent $m_2 = (T_2^2/T_1^2 - 1) \cdot m$.

7. a. En présence de frottements, l'amplitude et le nombre des oscillations du mobile diminuent. La période (nommée pseudo-période) est proche de la période propre du système non amorti.

b. En présence de frottements, les transferts d'énergie successifs entre les formes cinétique et potentielle élastique ne s'effectuent pas sans pertes. L'énergie mécanique ne se conserve pas et une partie de l'énergie est transférée sous forme thermique au milieu extérieur : il y a dissipation d'énergie.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : Analyser les transferts énergétiques au cours de mouvements

1. 1. c.

2. d.

3. a.

2. 1. d.

2. c.

3. a.

4. b.

3. 1. À $t = 0$ s, le projectile étant immobile, $E_c(0) = 1/2 \cdot m \cdot v^2 = 0$ J. Au cours du mouvement, l'énergie cinétique du projectile augmente car sa vitesse augmente. La courbe 2 représente donc la variation de l'énergie cinétique.

Au cours de sa chute rectiligne et verticale, l'altitude z du projectile diminue : $E_{pp} = m \cdot g \cdot z$ diminue au cours du mouvement. La courbe 3 représente donc la variation de l'énergie potentielle de pesanteur.

La courbe 1 représente donc celle de l'énergie mécanique $E_m = E_c + E_{pp}$.

2. a. À $t = 0$ s, $z_0 = 10$ m, donc $E_{pp}(0) = 78,5$ J.

b. D'après la courbe 3, à la fin de la chute $E_{pp}(f) = 0$ J.

$$\Delta E_{pp} = E_{pp}(f) - E_{pp}(0) = -78,5 \text{ J.}$$

c. Par définition, lors du déplacement du centre d'inertie du projectile entre ses deux positions aux instants $t = 0$ s et $t = t_{\text{final}}$: $W(\vec{P}) = m \cdot g \cdot (z_0 - z_f)$.

$$W(\vec{P}) = m \cdot g \cdot z_0 - m \cdot g \cdot z_f = E_{pp}(0) - E_{pp}(f) = -\Delta E_{pp}.$$

3. a. À $t = 1,4$ s.

b. $E_c(\text{max}) = E_c(f) = 78,5$ J. $\Delta E_c = E_c(f) - E_c(0) = 78,5$ J car $E_c(0) = 0$ J.

c. Seule l'action de la Terre agit sur le projectile lors de sa chute. On constate :

$$\Delta E_c(\text{AB}) = -\Delta E_{pp}(\text{AB}) = W(\vec{P}).$$

$$\Delta E_c = W(\vec{P}) = 78,5 \text{ J.}$$

4. a. Lors de la chute libre d'un projectile, l'énergie potentielle de pesanteur, maximale au départ, est progressivement et entièrement libérée sous forme d'énergie cinétique.

$$b. v = \sqrt{2} \cdot E_c/m = 14,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$5. \Delta E_c = -\Delta E_{pp}.$$

Les variations d'énergie cinétique et potentielle se compensent : $\Delta E_c + \Delta E_{pp} = 0$.

L'énergie mécanique du projectile est conservée :

$$\Delta E_c + \Delta E_{pp} = \Delta E_m = 0.$$

L'énergie mécanique reste donc constante au cours du temps.

$$E_m(t) = E_m(0) = E_m(f) = E_{pp}(0) = E_c(f) = 78,5 \text{ J.}$$

$$4. 1. E_{m(\text{initiale})} = 1/2 \cdot m \cdot v_0^2 + m \cdot g \cdot h = 3,6 \text{ J.}$$

2. a. En l'absence de frottement, l' E_m se conserve :

$$E_{m(\text{finale})} = E_{m(\text{initiale})} = 3,6 \text{ J.}$$

b. Au sommet de la trajectoire, la vitesse de la balle est nulle. Soit z_{max} l'altitude maximale atteinte par la balle.

$$E_{m(\text{finale})} = 1/2 \cdot m \cdot v_{\text{sommet}}^2 + m \cdot g \cdot z_{\text{max}} = m \cdot g \cdot z_{\text{max}}$$

$$1/2 \cdot m \cdot v_0^2 + m \cdot g \cdot h = m \cdot g \cdot z_{\text{max}} \text{ donc :}$$

$$z_{\text{max}} = h + 1/2 \cdot v_0^2/g = 8,2 \text{ m.}$$

3. $1/2 \cdot m \cdot v_0^2 + m \cdot g \cdot h = 1/2 \cdot m \cdot v^2 + m \cdot g \cdot z$ donc :

$$z = h + (v_0^2 - v^2)/(2 \cdot g) = 7 \text{ m.}$$

$$5. 1. E_{cf} = (1/2) m \cdot v_f^2 = 0,5 \times 9,5 \times 10^{-3} \times (260/3,6)^2 = 2,5 \times 10^7 \text{ J.}$$

2. Ce catapultage permet un transfert d'énergie potentielle élastique (emmagasinée dans la catapulte) en énergie cinétique.

3. On note x l'allongement du ressort :

$$E_m = (1/2) m \cdot v^2 + (1/2) k \cdot x^2.$$

4. En l'absence de frottement, l'énergie mécanique se conserve : $E_m = E_{cf} = E_{pe(\text{initiale})}$.

$$(1/2) m \cdot v_f^2 = (1/2) k \cdot \ell^2,$$

$$\text{donc } k = m \cdot (v_f/\ell)^2 = 8,8 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}.$$

COMPÉTENCE 2 : Effectuer l'étude énergétique d'un oscillateur

6 1. Faux. Seules trois oscillations apparaissent entièrement.

2. *Vrai.*

3. a. *Faux.*

$$E_{pe} = (1/2) k \cdot x_m^2 = 0,5 \times 3,0 \times 4^2 \times 10^{-4} = 2,4 \text{ mJ}.$$

b. *Vrai.*

c. *Vrai.*

4. a. *Faux.* E_c est maximale lorsque le jouet passe par la position d'équilibre.

b. *Vrai.* $x = 0 \text{ cm}$, donc $E_{pe} = 0 \text{ J}$.

5. a. *Faux.* C'est l'inverse.

b. *Vrai.* E_{pe} en E_c , puis E_c en E_{pe} , puis E_{pe} en E_c , puis E_c en E_{pe} .

7 1. Oscillateur mécanique : système mécanique évoluant de façon périodique (ou presque) autour d'une position d'équilibre.

2. Période propre : durée séparant deux passages successifs du système par une position donnée et dans le même sens.

3. La verticale.

4. L'amplitude.

8 Saut à l'élastique

Lors d'un saut à l'élastique les amateurs de sensations fortes subissent de nombreuses oscillations autour d'une position d'équilibre. Indiquer l'ordre dans lequel se produisent les transferts énergétiques suivants :

a. énergie cinétique en énergie potentielle de pesanteur ;

b. énergie cinétique en énergie potentielle élastique ;

c. énergie potentielle de pesanteur en énergie cinétique ;

d. énergie potentielle élastique en énergie cinétique.

c. ; b. ; d. ; a. ; c....

10 1. t : temps ; z_G : altitude du centre d'inertie du pendule ; θ : élongation du pendule ; v_G : vitesse du centre d'inertie ; E_c : son énergie cinétique ; E_{pp} : son énergie potentielle de pesanteur ; E_m : son énergie mécanique.

2. a. Dans le repère $(O ; x, y, z)$ choisi pour repérer les positions du centre d'inertie de la sphère, les altitudes z_G repérées sont négatives.

b.

$t \text{ (s)}$	0	0,08	0,2	0,36
$z_G \text{ (cm)}$	- 22,0	- 27,4	- 31,9	- 24,4
$\theta \text{ (}^\circ\text{)}$	46,4	31,5	- 0,75	- 40
$v_G \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	0	1,03	1,40	0,71
$E_c \text{ (mJ)}$	0	32	59	15
$E_{pp} \text{ (mJ)}$	- 129	- 161	- 188	- 144
$E_m \text{ (mJ)}$	- 129	- 129	- 129	- 129

3. a. L'énergie mécanique se conserve.

b. Il y a un transfert d'énergie potentielle de pesanteur en énergie cinétique (entre $t = 0 \text{ s}$ et $t \approx 0,2 \text{ s}$) puis d'énergie cinétique en énergie potentielle de pesanteur (entre $t \approx 0,2 \text{ s}$ et $t = 0,36 \text{ s}$).

COMPÉTENCE 3 : Mettre en évidence l'amortissement et la dissipation d'énergie

11 1. L'amortissement est dû à la présence de forces de frottement non négligeables.

2. L'amortissement entraîne une diminution de l'amplitude des oscillations au cours du temps.

3. Régime pseudo-périodique.

4. Pseudo-période : durée séparant deux passages successifs du système par sa position d'équilibre et en variant dans le même sens.

5. À condition que l'amortissement reste faible.

12 1. a. ❶ : régime pseudo-périodique. ❷ : régime périodique.

b. Initialement, le centre d'inertie du système est décalé de 5 cm par rapport à sa position d'équilibre.

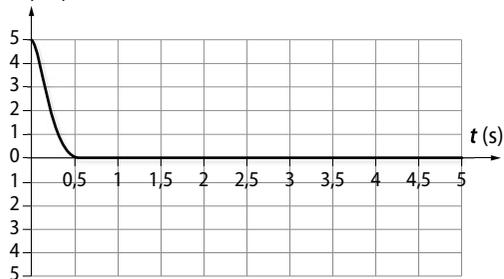
c. Sur le graphe, on mesure une longueur de 24,0 mm pour 5 pseudo-périodes T_1 et 29,0 mm pour 6 périodes propres T_2 . 4 s correspondent à 24,0 mm pour le graphe ❶ et 5 s à 32,0 mm pour le graphe ❷. La pseudo-période est $T_1 = 0,80 \text{ s}$ (pour le régime pseudo-périodique). La période propre est $T_2 = 0,76 \text{ s}$ (pour le régime périodique).

2. a. Dans le cas ❶ (régime pseudo-périodique) : les oscillations sont amorties car leur amplitude diminue progressivement au cours du temps.

b. L'amortissement des oscillations augmenterait. Leur nombre et leur amplitude diminueraient alors que la valeur de la pseudo-période augmenterait encore.

Lorsque les frottements deviennent trop importants, le régime devient apériodique : le centre d'inertie du système reprend sa position d'équilibre sans osciller.

c. x (cm)



14 1. a. Les énergies potentielle, cinétique et mécanique varient au cours du temps dans le premier cas. Dans le second, seules les énergies potentielle et cinétique varient. E_m reste constante.

b. Il y a des transferts successifs d'énergie potentielle en énergie cinétique et inversement dans les deux cas. Dans le cas ❶, ces transferts s'accompagnent aussi d'une dissipation d'énergie.

c. Entre $t = 0$ s et $t = 2$ s, $\Delta E_m = -30$ mJ dans le cas ❶ et $\Delta E_m = 0$ dans le cas ❷.

2. La présence de frottements entraîne une diminution de l'énergie mécanique.

3. Lorsque les oscillations sont amorties, le régime est pseudo-périodique (graphe ❶), dans le cas contraire il est périodique (graphe ❷).

15 1. a. En l'absence de frottements lors de la descente, l'énergie potentielle est entièrement convertie en énergie cinétique. Ainsi $1/2 \cdot m \cdot v_{\max}^2 = m \cdot g \cdot h$ soit :

$$v_{\max} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = 31,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

b. $v_{\max} < v_G$. L'énergie potentielle de pesanteur initiale n'est pas complètement transférée en énergie cinétique. Il y a dissipation d'énergie.

2. a. $E_{\text{dissipée}} = m \cdot g \cdot h - 1/2 \cdot m \cdot v^2 = 10,5 \text{ kJ}.$

$$E_{\text{dissipée}} = E_{\text{pp}(\text{initiale})} - E_{\text{c}(\text{finale})}.$$

b. Cette dissipation est due au travail de forces de frottements liées à l'air et à la piste glacée. Il s'agit de réduire les frottements en adoptant une position aérodynamique et en réduisant les frottements entre les skis et la glace.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

16 1. Faux. Initialement, E_c est maximale (la vitesse du ballon est maximale), E_{pp} est nulle (son altitude est nulle, elle correspond à celle de l'origine choisie) et $E_m = E_{\text{c}(\text{max})}$.

2. Vrai.

3. Faux. À $t = t_2$, E_c est minimale mais non nulle, E_{pp} est maximale et $E_m = E_{\text{pp}(\text{max})} + E_{\text{c}(\text{min})}$.

4. Vrai.

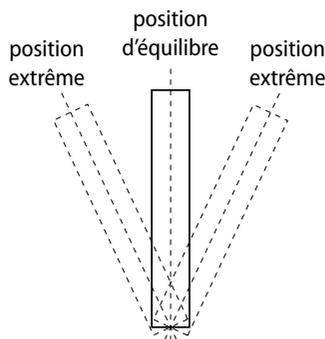
5. Faux. Graphiquement, $E_m = \text{constante}$. Il y a conservation de l'énergie mécanique, donc le travail qui modélise l'action des frottements est négligeable.

6. Vrai.

7. Vrai.

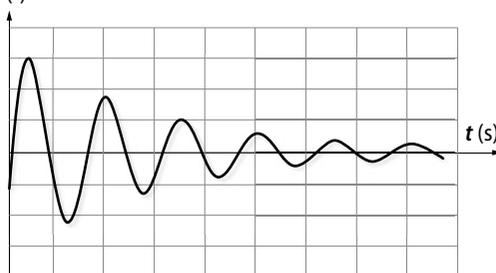
8. Faux. Il y a un transfert d'énergie cinétique en énergie potentielle entre $t = 0$ s et $t = t_2$, puis d'énergie potentielle en énergie cinétique.

17 1. a. et b.



2. a. Il s'agit d'oscillations amorties.

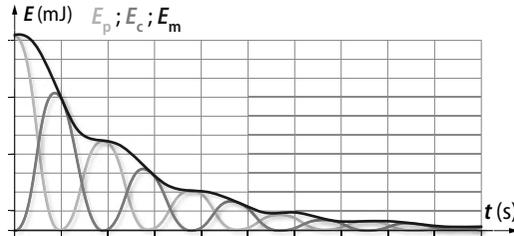
b. θ ($^\circ$)



3. a. Il se produit une succession de transferts d'énergie cinétique en énergie potentielle élastique et inversement.

b. Au cours des oscillations, l'énergie cinétique est maximale à l'instant du passage par la position d'équilibre, l'énergie potentielle élastique à l'instant du passage par une position extrême.

c.



4. a. Leur rôle est d'amortir les oscillations en dissipant progressivement l'énergie mécanique de l'oscillateur.

Ces systèmes permettent de diminuer progressivement l'amplitude des oscillations au cours du temps afin que l'oscillateur n'effectue que quelques oscillations avant de reprendre sa position d'équilibre.

b. De lourdes masses sont placées aux derniers étages des gratte-ciel et oscillent à la même fréquence que la tour mais en sens opposé afin de réduire l'amplitude des oscillations.

18 Amortissement

Les enregistrements suivants représentent les mouvements de quatre solides différents accrochés à un même ressort de constante de raideur $k = 10 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$.

1. Pour chaque enregistrement :

a. mesurer l'élongation initiale des oscillations ;

a : $x_0 = -5,0 \text{ cm}$; **b** : $x_0 = +10,0 \text{ cm}$; **c** : $x_0 = +8,0 \text{ cm}$;

d : $x_0 = -2,5 \text{ cm}$.

b. en déduire l'énergie potentielle élastique emmagasinée initialement ;

a : $E_{\text{pp0}} = 1,25 \times 10^{-2} \text{ J}$; **b** : $E_{\text{pp0}} = 5,00 \times 10^{-2} \text{ J}$;

c : $E_{\text{pp0}} = 3,20 \times 10^{-2} \text{ J}$; **d** : $E_{\text{pp0}} = 3,12 \times 10^{-3} \text{ J}$.

c. indiquer s'il s'agit d'oscillations amorties ou non amorties et qualifier le mouvement décrit par le solide ;

a ; **b** ; **d** sont des oscillations amorties ; **c** non amorties.

a et **b** : mouvement pseudo-périodique ; **d** : mouvement apériodique ; **c** : mouvement périodique.

d. déterminer, le cas échéant, la période propre ou pseudo-période du phénomène.

$T_{0\text{a}} = 1,0 \text{ s}$; $T_{0\text{b}} = 0,75 \text{ s}$; $T_{0\text{c}} \approx 0,7 \text{ s}$.

2. Classer des oscillateurs par amortissement croissant.

c - **a** - **b** - **d**.

19 1. **a.** La période d'un phénomène s'exprime en s.

b. Une période propre a donc la dimension d'un temps. $[T_0] = T$.

2. a. g est une accélération, quotient d'une vitesse par le temps : $[g] = [v]/T = L/T^2$ en $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Le newton ($P = m \cdot g$) s'exprime donc en $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$:

$$[P] = M \cdot L/T^2.$$

Ainsi $\text{N} \cdot \text{m}^{-1} = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^{-1} = \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$.

b. k s'exprime en $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ ou en $\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$ soit :

$$[k] = M \cdot L/(T^2 \cdot L) = M \cdot T^{-2}.$$

La période propre T_0 dépend de m et k , relation qu'il est possible d'écrire sous la forme $T_0 = 2\pi \cdot m^a \cdot k^b$ avec a égal à 1, $-1/2$ ou $1/2$ et b égal à -1 , $-1/2$ ou $1/2$ d'après les propositions de l'énoncé.

Ainsi, $[T_0] = M^a \cdot (M \cdot T^{-2})^b$ soit :

$$[T_0] = M^a \cdot M^b \cdot T^{-2b} = M^{a+b} \cdot T^{-2b}.$$

Pour que $M^{a+b} \cdot T^{-2b}$ soit homogène à un temps T , il faut que $a + b = 0$ et $b = -1/2$ donc $a = -b = +1/2$.

L'expression de T_0 est de la forme :

$$T_0 = 2\pi \cdot m^{1/2} \cdot k^{-1/2} = 2\pi \sqrt{(m/k)}.$$

Le rapport $\sqrt{k/m}$ s'exprime donc en s^{-1} ($\sqrt{(\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}/\text{kg})} = \text{s}^{-1}$) ; le rapport m/k en s^2 ($(\text{kg}/\text{kg}) \cdot \text{s}^{-2} = 1/\text{s}^{-2} = \text{s}^2$) et $\sqrt{m/k}$ en s ($\sqrt{(\text{kg}/\text{kg}) \cdot \text{s}^{-2}} = \sqrt{(1/\text{s}^{-2})} = \text{s}$).

Le rapport $\sqrt{m/k}$ est donc homogène à un temps.

20 1. La méthode consiste à mesurer sur les graphiques la longueur correspondant à plusieurs périodes d'une part, l'échelle de l'axe des temps d'autre part.

Sur le graphe, on mesure une longueur de 24,0 mm pour 5 T_1 et 29,0 mm pour 6 T_2 .

4,0 s correspondent à 24,0 mm pour le graphe 1 et 5,0 s à 32,0 mm pour le graphe 2.

2. **a.** Deux chiffres significatifs.

b. L'appareil de mesure étant gradué au mm, l'incertitude $\Delta \ell$ sur la mesure est égale à la demi-plus petite graduation soit $\Delta \ell = 0,5 \text{ mm}$.

c. Une erreur $\Delta \ell = 0,5 \text{ mm}$ modifie T de :

$$\Delta T = 0,0769 \text{ s} \approx 0,08 \text{ s pour } T_1$$

et $\Delta T = 0,0781 \text{ s} \approx 0,08 \text{ s pour } T_2$.

d. $0,72 \text{ s} < T_1 < 0,88 \text{ s}$ et $0,68 \text{ s} < T_2 < 0,84 \text{ s}$.

e. $\Delta T_1/T_1 = 0,08/0,80 \approx \Delta T_2/T_2 = 0,08/0,76 = 10 \%$.

La précision des mesures ne permet pas de différencier véritablement les valeurs T_1 et T_2 .

21 1. **a.** ℓ représente la longueur de la tige et g l'intensité de la pesanteur du lieu.

b. ℓ en m, g en $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ et T_0 en s.

2. **a.** L'intensité de la pesanteur est une grandeur qui dépend de l'altitude du lieu. La Paz, capitale la plus haute du monde, est une ville plus proche de l'équateur située à une altitude plus élevée $z_{\text{LP}} = 3\,660 \text{ m}$.

b. Pour que $T_0 = 2,000 \text{ s}$ à La Paz ($g_{\text{LP}} = 9,792 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$), il faut $\ell = 9,921 \times 10^{-1} \text{ m}$. Il faut donc remonter le disque métallique.

3. **a.** Les frottements de l'air fournissent un travail résistant sur le balancier et entraînent un amortissement des oscillations. Il s'agit donc de les réduire afin d'éviter un régime pseudo-périodique ou apériodique.

b. Sur une longue durée, les frottements liés à l'air et aux divers mécanismes de l'horloge, bien que faibles, ne sont non totalement négligeables : les oscillations du balancier sont ainsi faiblement amorties. Afin de conserver une amplitude suffisante, les oscillations sont entretenues par un transfert d'énergie potentielle de pesanteur issue du contrepoids.

22 1. $T_0 = 2\pi\sqrt{\ell/g}$ pour un pendule simple et $T_0 = 2\pi\sqrt{m/k}$ pour un pendule élastique.

a. La période propre d'un pendule simple est donc indépendante de sa masse et ne sera pas modifiée. Celle d'un pendule élastique sera multipliée par $\sqrt{2}$. Les oscillations seront plus lentes.

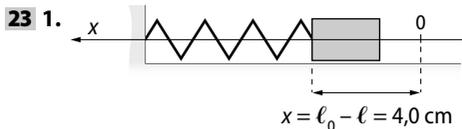
b. Pour le pendule élastique, la période est indépendante de g . Pour le pendule simple, la période propre sera multipliée par $\sqrt{2}$.

2. a. La période propre des petites oscillations d'un pendule simple dépend de la valeur de l'intensité de la pesanteur, mais ne dépend pas de sa masse. Inversement, pour un pendule élastique, la période propre des oscillations dépend de sa masse, mais pas de l'intensité de la pesanteur.

b. Un pendule élastique.

3. a. $g = \ell \cdot (2\pi/T_0)^2 = 3,73 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

b. $T_0 = 2\pi\sqrt{\ell/g} = 1,42 \text{ s}$ soit 32,4 oscillations à Paris.



2. a. Sous forme d'énergie potentielle élastique.

b. $E_{pe} = 1/2 \cdot k \cdot x^2 = 1,6 \times 10^{-2} \text{ J}$ à $t = 0 \text{ s}$ et $E_{pe} = 0 \text{ J}$ lors du passage par la position d'équilibre.

3. a. Il y a transfert d'énergie potentielle élastique en énergie cinétique.

b. À $t = 0 \text{ s}$, $E_c = 0 \text{ J}$. Lors du passage par la position d'équilibre, $E_c(0) = 1,6 \times 10^{-2} \text{ J}$.

c. $v_0 = \sqrt{2 \cdot E_c(0)/m} = 6,3 \times 10^{-1} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

24 1. a. Initialement, le système possède de l'énergie cinétique. $E_c = 1/2 \cdot m \cdot v_0^2 = 0,5 \times 20 \times 10,0^2 = 1,0 \text{ kJ}$.

b. Sous la forme d'énergie potentielle élastique.

2. a. L'énergie mécanique se conserve en l'absence de frottement.

b. $E_m = E_c + E_{pe} = 1/2 \cdot m \cdot v_G^2 + 1/2 \cdot k \cdot x_G^2$.

c. E_c : courbe mauve ; E_{pe} : courbe rose ; E_m : courbe bleue.

3. a. Lorsque E_{pe} est maximale, $x_G = x_{\max}$ et $E_c = 0 \text{ J}$. $E_{pe} = 1/2 \cdot k \cdot x_{\max}^2 = E_m = 1,0 \text{ kJ}$ donc $x_{\max} = 0,37 \text{ m}$.

$T_0 = 2\pi \cdot \sqrt{m/k} = 0,23 \text{ s}$.

b. 1 cm représente $5,5 \times 10^{-2} \text{ s}$ horizontalement et 1 cm représente 455 J verticalement.

25 1. a. Phase 1 : mouvement rectiligne accéléré entre $t = 0 \text{ s}$ et $t = 0,7 \text{ s}$.

Phase 2 : mouvement rectiligne uniforme à partir de $t = 0,7 \text{ s}$.

b. Au cours de son mouvement, la bille est soumise à l'action de son poids et de frottements visqueux liés à son déplacement au sein du fluide.

L'action du poids reste supérieure à celle des forces de frottements tant que la vitesse reste inférieure $2,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. L'application de la deuxième loi de Newton permet donc bien de conclure à un mouvement accéléré lors de la première phase.

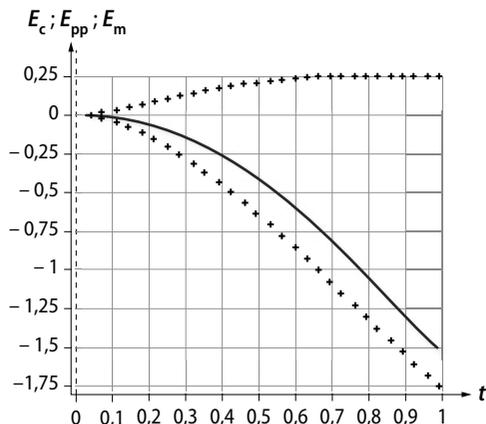
Lorsque la vitesse limite est atteinte, les forces de frottement compensent le poids de la bille, le mouvement devient rectiligne uniforme (première loi de Newton).

2. a. L'énergie cinétique de la bille augmente dans la première phase puis reste constante dès le début de la seconde phase.

Les énergies potentielle de pesanteur et mécanique diminuent au cours des deux phases.

b. Courbe verte : énergie cinétique ; courbe bleue : énergie potentielle de pesanteur.

c. $E_m = E_c + E_{pp}$



3. a. Au cours de la première phase :

$$\Delta E_{c1} = 0,25 \text{ J et } \Delta E_{pp1} = -1,1 \text{ J}$$

Au cours de la seconde phase :

$$\Delta E_{c2} = 0 \text{ J et } \Delta E_{pp2} = -1,75 + 1,1 = -0,65 \text{ J}$$

b. $\Delta E_m = \Delta E_c + \Delta E_{pp}$ soit $\Delta E_{m1} = -0,85 \text{ J et } \Delta E_{m2} = -0,65 \text{ J}$.

c. La bille est soumise à des frottements non négligeables car son énergie mécanique diminue.

4. a. $W_1(\vec{f}) = \Delta E_{m1} = -0,85 \text{ J et } W_2(\vec{f}) = \Delta E_{m2} = -0,65 \text{ J}$. Il s'agit d'un travail résistant dans chaque cas.

b. $W_2(\vec{P}) = -\Delta E_{pp2} = 0,65 \text{ J et } W_1(\vec{P}) = -\Delta E_{pp1} = 1,1 \text{ J}$. Le travail est moteur.

5. Au cours de la première phase, il y a transfert d'énergie potentielle de pesanteur en énergie cinétique et dissipation d'énergie (sous forme thermique). Au cours de la seconde phase, il y a dissipation d'énergie potentielle de pesanteur sous forme thermique.

26 1. Lors du mouvement, il y a transfert d'énergie cinétique en énergie potentielle de pesanteur.

2. a. En A, à $t = 0 \text{ s}$, $E_{m(A)} = 1/2 \cdot m \cdot v_0^2 + m \cdot g \cdot z_{(A)}$. En choisissant l'origine des altitudes en A :

$$z_{(A)} = 0 \text{ m et } E_{m(A)} = 1/2 \cdot m \cdot v_0^2 = 2,0 \times 10^{-1} \text{ J}$$

b. Les frottements étant négligés, l'énergie mécanique de la balle se conserve au cours du mouvement.

En B, $E_{m(B)} = E_{m(A)} = 2,0 \times 10^{-1} \text{ J}$.

3. a. Soit C le point atteint par la balle lorsque son mouvement cesse : $v_c = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Détermination de la distance AC parcourue.

$$\begin{aligned} \Delta E_{mA \rightarrow C} &= E_{m(C)} - E_{m(A)} = E_{c(C)} + E_{p(C)} - E_{c(A)} - E_{p(A)} \\ &= E_{p(C)} - E_{c(A)} = 0. \end{aligned}$$

$$1/2 \cdot m \cdot v_0^2 = m \cdot g \cdot z_{(C)} \text{ soit } z_{(C)} = v_0^2/2g = 4,6 \times 10^{-1} \text{ m}.$$

AC = $z_{(C)}/\sin \alpha = 5,3 \text{ m}$. La balle atteint le trou.

b. Détermination de la vitesse v_B de la balle.

$$\Delta E_{mA \rightarrow B} = E_{c(B)} + E_{p(B)} - E_{c(A)} - E_{p(A)} = 0$$

$$E_{c(B)} = E_{c(A)} - E_{p(B)} \text{ soit } v_B^2 = v_0^2 - 2g \cdot AB \cdot \sin \alpha$$

$$\text{et } v_B = 6,7 \times 10^{-1} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

4. Soit D le point atteint par la balle lorsque son mouvement cesse.

$$\begin{aligned} W_{AB}(\vec{f}) &= -f \cdot AD = 1/5 \cdot m \cdot g \cdot (z_{(A)} - z_{(D)}) \\ &= -1/5 \cdot m \cdot g \cdot AD \cdot \sin \alpha. \end{aligned}$$

5. a. Détermination de la distance AD parcourue ($v_D = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).

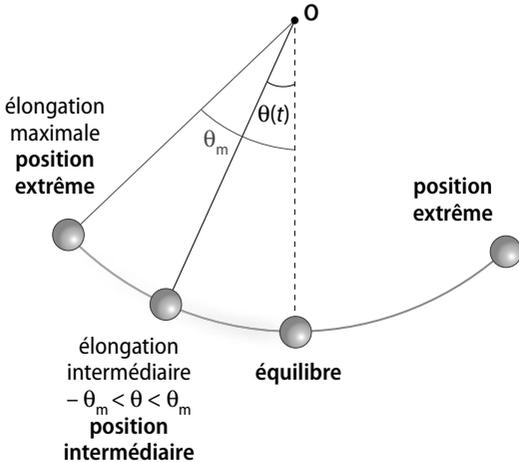
$$\begin{aligned} \Delta E_{mA \rightarrow D} &= E_{m(D)} - E_{m(A)} = E_{p(D)} - E_{c(A)} \\ &= -1/5 \cdot m \cdot g \cdot AD \cdot \sin \alpha. \end{aligned}$$

$$m \cdot g \cdot AD \cdot \sin \alpha - 1/2 \cdot m \cdot v_0^2 = -1/5 \cdot m \cdot g \cdot AD \cdot \sin \alpha, \text{ soit } 6/5 \cdot AD \cdot \sin \alpha = v_0^2/2g \text{ et } AD = 5 v_0^2/(12 \cdot g \cdot \sin \alpha) = 4,4 \text{ m}.$$

La balle n'atteint pas le trou.

b. À 60 cm.

27 1. a.



b. En position d'équilibre, le pendule dispose d'une énergie cinétique maximale et d'une énergie potentielle de pesanteur minimale. Dans une position extrême, son énergie cinétique est nulle alors que son énergie potentielle de pesanteur est maximale.

2. a. Dans le cas d'un chronométrage $\Delta t = T_0 = 1,04 \text{ s}$ au centième sur une seule oscillation, l'incertitude sur la mesure vaut $\Delta T_0 = 0,10 \text{ s}$.

$T_0 = 1,04 \text{ s} \pm 0,10 \text{ s}$, soit une précision de 9,6 %.

Dans le cas d'un chronométrage $\Delta t = 10T_0 = 10,42 \text{ s}$ au centième sur dix oscillations, l'incertitude sur la mesure vaut $\Delta T_0 = 0,10 \text{ s}$.

$10T_0 = 10,42 \text{ s} \pm 0,10 \text{ s}$, soit $T_0 = 1,042 \text{ s} \pm 0,010 \text{ s}$ une précision de 0,96 %.

Le fait de mesurer la durée de plusieurs oscillations améliore la précision de la mesure.

b. Il ne faut pas prendre un nombre trop grand d'oscillations. En effet, l'amplitude des oscillations diminue au cours du temps à cause de l'amortissement dû aux frottements. Lorsqu'elle devient faible, le repérage des oscillations et la mesure des périodes deviennent plus imprécises.

3. a. La valeur moyenne, soit $T_0 = 12,54/10 = 1,254 \text{ s}$ pour la première série et $T_0 = 12,45/10 = 1,245 \text{ s}$ pour la seconde.

b. Première série : $\sigma = 6,22 \times 10^{-3} \text{ s}$;

seconde série : $\sigma = 8,71 \times 10^{-3} \text{ s}$.

c. $\Delta T_0 = 2\sigma$ et $T_0 = T_0 \pm \Delta T_0$ donc pour la première série : $\Delta T_0 = 1,24 \times 10^{-2} \text{ s}$ et pour la seconde :

$$\Delta T_0 = 1,74 \times 10^{-2} \text{ s}.$$

La précision de la première méthode est de 0,992 %, de la seconde 1,40 %.

4. Il est préférable de :

- déclencher le chronomètre après une ou deux oscillations (il est difficile de le faire au moment du lâcher du pendule) ;
- déclencher le chronomètre à l'instant où le pendule passe par une position extrême (plus facilement repérable car la vitesse du pendule s'annule) ;
- raisonner sur plusieurs oscillations.

Temps et relativité restreinte

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
<ul style="list-style-type: none"> – Définition du temps atomique. – Invariance de la vitesse de la lumière et caractère relatif du temps. – Postulat d'Einstein. Tests expérimentaux de l'invariance de la vitesse de la lumière. – Notion d'événement. Temps propre. – Dilatation des durées. – Preuves expérimentales. 	<ul style="list-style-type: none"> – Extraire et exploiter des informations relatives à la mesure du temps pour justifier l'évolution de la définition de la seconde. – Extraire et exploiter des informations sur l'influence des phénomènes dissipatifs sur la problématique de la mesure du temps et la définition de la seconde. – Extraire et exploiter des informations pour justifier l'utilisation des horloges atomiques dans la mesure du temps. – Savoir que la vitesse de la lumière dans le vide est la même dans tous les référentiels galiléens. – Définir la notion de temps propre. – Exploiter la relation entre durée propre et durée mesurée. – Extraire et exploiter des informations relatives à une situation concrète où le caractère relatif du temps est à prendre en compte.

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. S'informer sur la problématique de la mesure du temps.
2. Prendre en compte l'invariance de la vitesse de la lumière et la relativité du temps.
3. Exploiter la relation entre durée propre et durée mesurée.

Évaluation diagnostique

p. 214

SITUATION 1

Cette situation a pour objet d'amorcer la réflexion sur ce qui peut faire la qualité d'une horloge (ou d'une montre). De façon générale, les qualités d'une horloge sont, comme tout instrument de mesure, la stabilité (la fiabilité) – la mesure du temps est reproductible, régulière et ne dérive pas – et la précision – la mesure du temps est basée sur un étalon le plus petit possible. Ces qualités sont évoquées plus en détail dans l'activité 1.

SITUATION 2

Cette situation a pour objet de revenir sur la loi de la relativité de mouvement vue en classe de Seconde et

de mettre en évidence la limite de cette loi dans le cas de la lumière par exemple.

Pour le pilote du vaisseau, la vitesse des tirs lasers peut-elle être nulle comme pourrait le prétendre la loi de la relativité du mouvement ? Peut-on imaginer que la lumière ait une vitesse nulle dans un référentiel ?

L'activité 2 permettra de montrer que la vitesse de la lumière est un invariant (postulat d'Einstein).

SITUATION 3

Cette situation a pour objet de vérifier que le théorème de Pythagore est maîtrisé par les élèves et qu'ils peuvent l'utiliser dans une situation contextualisée où l'on cherche à déterminer une distance inconnue. En mesurant les distances d_1 et d_2 à l'aide d'un télémètre (dont le principe repose sur la mesure du temps d'un aller-retour de la lumière entre deux points), il est possible d'en déduire la hauteur H en utilisant le théorème de Pythagore.

D'après le théorème de Pythagore, $d_1^2 = d_2^2 + H^2$ donc :

$$H = (d_1^2 - d_2^2)^{1/2}.$$

Ce rappel sera utile pour la mise en œuvre de l'activité 4, où l'on fera modéliser la dilatation du temps par les élèves.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

La mesure du temps

p. 216

1. a. Une horloge mécanique se base sur un phénomène périodique mécanique comme le mouvement oscillant d'un balancier.
b. Les inconvénients d'une telle horloge sont qu'elle :
 - est peu précise ;
 - nécessite d'être remontée régulièrement.
2. a. Une montre à quartz se base sur la fréquence de vibration du quartz qui a la particularité de vibrer quand il est parcouru par un courant électrique.
b. La fréquence du quartz est très stable et permet une bonne précision dans la mesure du temps.
3. a. Une horloge atomique se base sur la fréquence du rayonnement qui accompagne la transition entre deux niveaux d'énergie d'un atome (comme par exemple le césium).
b. Une telle horloge est plus stable et plus précise que n'importe quelle autre horloge.
c. La fréquence du quartz est $f_q = 32\,768$ Hz.
4. L'ancienne définition de la seconde la définit comme la $1/86\,400^{\text{e}}$ partie du jour solaire moyen. En effet, un jour solaire compte 24 h, soit $24 \times 3\,600 = 86\,400$ s. La définition la plus récente de la seconde la définit comme la durée de $9\,192\,631\,770$ périodes de la radiation correspondant à la transition de deux niveaux d'énergie de l'atome de césium. En effet, la fréquence correspondante est de $9\,192\,631\,770$ Hz.
5. Les qualités d'une horloge sont la stabilité et la précision.
6. L'évolution de la définition de la seconde a évolué avec l'évolution scientifique et technologique : la définition précédente était basée sur un phénomène périodique astronomique et la définition actuelle se base sur la durée d'une période d'un rayonnement émis ou absorbé au niveau d'un atome.

ACTIVITÉ 2

La vitesse de la lumière en question

p. 217

1. a. Au départ, le but de l'expérience de Michelson et Morley a été d'appliquer la relativité de mouvement à la lumière.
b. Le dispositif permet de comparer la durée d'un trajet identique effectué par deux faisceaux lumineux : l'un correspond à une lumière se propageant dans la direction du mouvement de la Terre et l'autre à une lumière se propageant dans une direction perpendiculaire.
2. a. L'intérêt d'un miroir semi-argenté est qu'il permet à un faisceau incident d'être en partie réfléchi et en partie transmis.

b. Dans le dispositif, le miroir semi-argenté doit être incliné de 45° pour que les faisceaux réfléchis et transmis soient perpendiculaires.

3. a. Le phénomène optique utilisé ici est le phénomène d'interférence.

b. Les paramètres identifiés par Michelson et Morley qui peuvent avoir une conséquence sur le phénomène étudié sont :

- le retard de propagation ;
- la distance parcourue.

4. a. La vitesse de la lumière est un invariant.

b. Ce résultat est en contradiction avec la physique classique connue jusque-là où le mouvement est relatif, autrement dit où la vitesse d'un système d'étude dépend du référentiel.

ACTIVITÉ 3

La relativité du temps

p. 218

1. a. Au moment du tir laser, la Terre se situe devant la navette spatiale.

Au moment de la détection du signal réfléchi, la Terre se situe derrière la navette spatiale.

b. Dans la figure 2(a), le référentiel est la Terre.

c. Dans la figure 2(b), le référentiel est la navette spatiale.

2. D'après le postulat d'Einstein, la vitesse de la lumière ne dépend ni du mouvement de la source ni de celui de l'observateur, donc ne dépend pas du référentiel.

3. a. La lumière laser va parcourir une distance plus importante dans le référentiel de la navette spatiale.

b. La durée de propagation de la lumière laser est donc plus importante quand le référentiel est la navette spatiale.

4. La vitesse de la lumière est un invariant, donc elle est la même pour un observateur stationnaire et pour un observateur en mouvement.

5. a. La durée séparant deux événements qui se produisent au même endroit n'est pas la même pour un observateur stationnaire et pour un observateur en mouvement.

b. La durée se dilate dans un référentiel en mouvement.

ACTIVITÉ 4

Modéliser la dilatation du temps

p. 219

1. Dans le cas de l'observateur terrestre :

a. Pour faire un aller-retour Terre-Lune, la distance parcourue par la lumière laser est de $2d$.

b. On en déduit la durée propre Δt_p mise par le rayon laser pour faire l'aller-retour Terre-Lune :

$$c = 2d/\Delta t_p \text{ donc } \Delta t_p = 2d/c.$$

2. Dans le cas de l'observateur embarqué dans la navette spatiale qui se déplace à une vitesse v :

a. La distance parcourue par la lumière laser pour faire l'aller-retour Terre-Lune est de $2D$.

On en déduit la durée mesurée Δt_m mise par le rayon laser pour faire l'aller-retour Terre-Lune :

$$c = 2D/\Delta t_m \text{ donc } \Delta t_m = 2D/c.$$

b. Δt_m est la durée que met le vaisseau spatial pour parcourir la distance L à la vitesse v .

$$v = L/\Delta t_m \text{ donc } \Delta t_m = L/v.$$

3. a. En utilisant le théorème de Pythagore, on peut écrire :

$$D^2 = d^2 + (L/2)^2.$$

$$b. D = \Delta t_m \cdot c/2.$$

$$d = \Delta t_p \cdot c/2.$$

$$L = \Delta t_m \cdot v.$$

$$\text{Donc } (\Delta t_m \cdot c/2)^2 = (\Delta t_p \cdot c/2)^2 + (\Delta t_m \cdot v/2)^2$$

$$(\Delta t_m \cdot c)^2 = (\Delta t_p \cdot c)^2 + (\Delta t_m \cdot v)^2$$

$$\Delta t_m^2 \cdot (c^2 - v^2) = (\Delta t_p \cdot c)^2$$

$$\Delta t_m^2 \cdot (1 - (v/c)^2) = \Delta t_p^2$$

$$4. a. \Delta t_m^2 \cdot (1 - (v/c)^2) = \Delta t_p^2$$

$$\text{donc } \Delta t_m = (1/(1 - (v/c)^2)^{1/2}) \cdot \Delta t_p$$

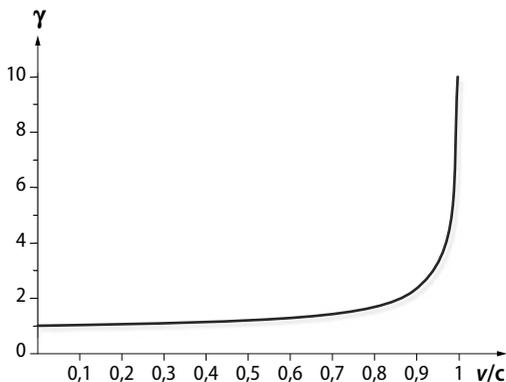
$$\text{donc } \Delta t_m = \gamma \Delta t_p$$

avec γ facteur de Lorentz $\gamma = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2}$.

b. En admettant que la vitesse de lumière dans le vide est une vitesse limite, $\gamma = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2} \geq 1$.

Donc $\Delta t_m \geq \Delta t_p$, ce qui met en évidence la dilatation des durées pour un observateur en mouvement.

5. a. À l'aide d'un tableur-grapheur ou d'une calculatrice, on peut représenter l'évolution du facteur de Lorentz γ en fonction de (v/c) :



b. D'après la représentation graphique précédente :

– quand v atteint une vitesse de l'ordre du $1/20^{\text{e}}$ de celle de la lumière, $(v/c) = 0,2$, $\gamma > 1$, donc la dilatation du temps est notable ;

– quand v se rapproche de la vitesse de la lumière c , (v/c) tend vers 1, γ tend vers l'infini, donc la dilatation du temps est colossale.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : S'informer sur la problématique de la mesure du temps

1. 1. b et c.

2. b.

3. a.

2 1. Vrai.

2. Faux. Les systèmes mécaniques oscillants construits par l'Homme subissent des phénomènes dissipatifs et ne permettent donc pas une mesure régulière du temps.

3. Faux. Le quartz vibre à une fréquence connue dès lors qu'il est traversé par un courant.

4. Vrai.

3 1. Un phénomène physique peut servir d'horloge à condition qu'il se répète exactement « autant de fois qu'on le désire », autrement dit qu'il s'agit d'un phénomène périodique.

2. L'unité de temps correspondante est alors définie comme l'intervalle entre le commencement et la fin d'une période du phénomène.

3. Une horloge sert à mesurer des intervalles de temps.

4 1. La propriété d'un pendule utilisée dans une horloge mécanique à poids est l'isochronisme : la durée d'une oscillation ne dépend que sa longueur.

2. Le rôle du « poids » est d'entretenir les oscillations.

3. La limite d'un tel système est que le « poids » doit être remonté régulièrement pour pouvoir continuer à entretenir le mécanisme.

5 1. La définition de la seconde se base sur l'horloge atomique au césium.

2. Le nombre de périodes donné dans cette définition correspond à la fréquence (nombre de périodes par seconde) du rayonnement qui accompagne la transition entre deux niveaux d'énergie parfaitement connue de l'atome de césium.

3. Cette définition de la seconde est précise, car le nombre de périodes d'oscillations qui permet de définir une seconde est très important. Elle est stable car la fréquence du rayonnement est constante.

6 1. L'étalon de temps utilisé pour établir le temps universel (UT) est la durée d'une journée.

2. Le temps atomique international (TAI) est établi en faisant la moyenne des informations provenant de plusieurs centaines d'horloges atomiques réparties en différents endroits du globe.

3. Il est pertinent de tenir compte de ces deux types de temps pour assurer une précision dans la mesure du temps et pour maintenir une cohérence avec l'alternance des jours et des nuits.

COMPÉTENCE 2 : Prendre en compte l'invariance de la vitesse de la lumière et la relativité du temps

7 1. b.

2. a et c.

3. b.

8 1. *Faux.* Elle ne dépend pas du mouvement de l'observateur.

2. *Faux.* Il a un caractère relatif.

3. *Vrai.*

4. *Faux.* La dilatation du temps pour un système en mouvement peut se démontrer expérimentalement à l'aide d'horloges très précises et pour une vitesse très importante.

9 Le prix Nobel de physique 1907

Michelson inventa son interféromètre pour mettre en évidence l'effet du mouvement de la Terre sur la vitesse de la lumière. En collaboration avec Morley, et en utilisant l'interféromètre, il montra que la lumière avait une vitesse constante dans tout référentiel. Cette expérience sur la vitesse de la lumière est l'une des expériences historiques les plus remarquables de physique et a permis le développement de la théorie de la relativité d'Einstein. Michelson a reçu le Prix Nobel en 1907 pour son travail.

1. *Quelle est la particularité de la vitesse de la lumière ?*
La vitesse de la lumière est constante dans tout référentiel.

2. *Pourquoi l'expérience de Michelson-Morley était-elle importante pour la physique ?*

Elle permit à Einstein de développer sa théorie de la relativité.

10 1. a. Le résultat de l'expérience de Michelson et Morley met en évidence que la lumière se propage, dans tout référentiel, toujours à la même vitesse c .

b. Ce résultat est en contradiction avec la mécanique rationnelle galiléenne, car elle remet en cause le caractère relatif du mouvement.

2. a. « Deux événements spatialement séparés » sont deux événements qui se produisent en deux lieux différents.

b. Deux événements en apparence simultanés ne le sont pas forcément en raison de la dilatation du temps pour un observateur en mouvement.

c. La conséquence importante pour le temps est qu'il n'est pas absolu.

11 1. On parle de « paradoxe » des jumeaux car deux jumeaux doivent avoir constamment le même âge, ce qui n'est pas le cas ici.

2. La dilatation du temps est la conséquence de la théorie d'Einstein qui est validée par l'expérience réalisée dans les accélérateurs de particules.

3. La dilatation du temps dépend de la vitesse de l'objet en mouvement.

COMPÉTENCE 3 : Exploiter la relation entre durée propre et durée mesurée

12 1. a.

2. a et c.

3. a, b et c.

13 1. *Faux.* Si la vitesse de déplacement est celle de la lumière, la durée mesurée est infinie.

2. *Faux.* La durée propre entre deux événements est déterminée par une horloge placée au lieu où se déroulent ces événements.

c. *Vrai.*

14 1. Pour la personne présente sur le quai, la durée de la mesure au télémètre est plus longue car le trajet effectué par la lumière est plus important.

2. La durée de la mesure est :

– la « durée propre » pour la personne présente dans le train ;

– la « durée mesurée » pour la personne présente sur le quai.

3. La relation entre ces deux durées dépend de la vitesse de déplacement du train.

16 1. Pour un observateur resté sur Terre, la durée du voyage serait de $\Delta t_m = 0,80 \times 4,2 = 3,4$ années.

2. a. $\Delta t_m = \gamma \cdot \Delta t_p$
 $\gamma = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2} = 1/(1 - 0,80^2)^{1/2} = 1,7$,
donc $\Delta t_p = \Delta t_m / \gamma = 3,4 / 1,67 = 2$ années.

b. Pour diviser par 2 la durée du voyage pour les passagers, il faudrait que $\gamma = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2} = 2$
donc que $(1 - (v/c)^2)^{1/2} = 0,5$
donc que $1 - (v/c)^2 = 0,25$
donc que $(v/c)^2 = 0,75$
soit $v = 0,87 c$.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

17 1. $\gamma = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2}$
 $= 1/(1 - (260/(3,00 \times 10^8))^2)^{1/2} = 1,00$.

2. Le décalage peut être considéré comme nul.

18 Une horloge atomique au césium permet une précision à la nanoseconde, c'est-à-dire à 10^{-9} s.

Pour déterminer à partir de quelle vitesse de déplacement la dilatation du temps peut être mesurable avec une telle horloge atomique, on cherche la valeur de v telle que $1/(1 - (v/c)^2)^{1/2} = 1,000\,000\,001$.
 $v = 4,47 \times 10^{-5} \times c$.

19 La précision de la mesure du temps

Le graphe présente l'évolution de la précision de la mesure du temps au cours des derniers siècles.

1. a. Quelle était l'incertitude de mesure pour un oscillateur mécanique comme le pendule d'Huygens ?

L'incertitude de mesure pour un oscillateur comme le pendule d'Huygens est, d'après le graphe, de 10 secondes sur une journée.

b. Comment expliquer cette incertitude importante dans la mesure du temps ?

Ce sont les effets dissipatifs qui expliquent cette incertitude importante dans la mesure du temps.

2. a. Combien de fois les horloges atomiques commercialisées sont-elles plus précises que les oscillateurs à quartz ?

Les horloges atomiques commercialisées sont 10 000 fois plus précises que les oscillateurs à quartz puisqu'on passe d'une incertitude de 10^{-4} s à 10^{-8} s par jour.

b. Où sont utilisées ces horloges ultra-précises ?

Ces horloges ultra-précises sont utilisées dans les systèmes GPS par exemple.

3. Au bout de combien d'années les horloges les plus récentes présentent-elles une erreur d'une seconde ?

Les horloges les plus récentes présentent une incertitude de 10^{-12} s par jour donc de :

$$10^{-12} \times 365 = 3,65 \times 10^{-12} \text{ s par an.}$$

Elles présenteront une erreur d'une seconde au bout de :

$$1/(3,65 \times 10^{-12}) = 2,74 \times 10^{11} \text{ années.}$$

20 1. a. γ tend vers l'infini.

b. Cela signifie que l'horloge associée à l'objet en mouvement a une vitesse considérablement ralentie.

2. a. Pour dilater le temps par 2 au niveau de l'horloge associée à l'objet en mouvement, le coefficient de Lorentz doit être égal à 2.

b. Par lecture graphique, $v/c = 0,9$, donc $v = 0,9c$.

21 1. La vitesse de la lumière dans le vide est $c = 3,00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dans tout référentiel (postulat d'Einstein sur l'invariance de la vitesse de lumière).

2. Le tir laser est émis toutes les 0,5 s. Donc la durée entre deux tirs est de 0,5 s.

3. On détermine le coefficient de Lorentz pour évaluer l'impact de la dilatation du temps :

$$\gamma = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2}.$$

A.N. : $\gamma = 1/(1 - (0,5c/c)^2)^{1/2}$, soit $\gamma = 1,15$.

Pour l'observateur extérieur, les durées se dilatent et la durée entre deux tirs est de 0,6 s.

22 1. a. Pour une personne restée sur Terre, le voyage Terre-Bételgeuse dure 300 années (puisque la distance parcourue est de 300 années de lumière de la Terre et le vaisseau se déplace à une vitesse voisine de celle de la lumière).

b. La différence importante avec la durée perçue par les voyageurs du vaisseau s'explique par le phénomène de dilatation du temps qui est d'autant plus important que la vitesse de déplacement est proche de celle de la lumière.

2. $\Delta t_m = 300$ années.

$\Delta t_p = 2$ années.

Donc $\gamma = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2} = 150$.

On en déduit que $v \approx c$.

On retrouve bien la vitesse donnée par l'auteur du roman.

23 1. a. L'intérêt d'utiliser des horloges atomiques est de mesurer des temps et des durées avec une grande précision.

b. Deux horloges se synchronisent quand elles indiquent le même temps à un instant donné.

2. a. Par rapport à la Terre, les distances parcourues par les fusées à la date τ valent respectivement $\Delta d_1 = v_1 \cdot \tau$ et $\Delta d_2 = v_2 \cdot (\tau - T)$.

b. À l'instant de la rencontre, $\Delta d_1 = \Delta d_2$; on en déduit :

$$\tau = v_2 \cdot T / (v_2 - v_1).$$

3. a. Pour la fusée 1, le décollage de la fusée 2 a lieu à l'instant $T_1 = \gamma_1 \cdot T$ avec $\gamma_1 = 1/(1 - (v_1/c)^2)^{1/2}$.

b. Pour la fusée 1, la rencontre avec la fusée 2 a lieu à l'instant $\tau_1 = \tau/\gamma_1$ avec $\gamma_1 = 1/(1 - (v_1/c)^2)^{1/2}$, car dans ce cas, τ_1 est la durée propre qui est mesurée lors de la rencontre des deux fusées par la fusée 1.

24 1. Dans le cas où l'objet en mouvement est un avion à réaction :

$$\gamma = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2}$$

$$= 1 / (1 - (10^6 / (3\,600 \times 3,00 \times 10^8))^2)^{1/2}$$

$$= 1,000\,000\,000\,000\,4.$$

2. La dilatation du temps est notable dans les conditions de l'expérience pour des horloges précises à 10^{-13} seconde, donc les horloges atomiques ont pu effectivement la déceler.

25 1. a. L'intervalle de temps qui correspond en relativité à la durée propre Δt_p est la durée qui sépare l'envoi de signaux lumineux par la fusée, autrement dit $\Delta t_p = 1$ s.

b. L'intervalle de temps qui correspond en relativité à la durée mesurée Δt_m est l'intervalle qui sépare deux signaux lumineux vus de la Terre.

2. a. Comme la fusée se déplace de façon rectiligne à une vitesse constante, la relation entre durée mesurée et durée propre est applicable.

b. Pour déterminer l'intervalle de temps avec lequel sont perçus les signaux qui sont détectés sur Terre, on détermine le coefficient de Lorentz :

$$\gamma = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2} = 1/(1 - (250\,000\,000/3,00 \times 10^8)^2)^{1/2} = 1,81.$$

Donc $\Delta t_m = 1,81$ s.

26 1. En raisonnant en physique classique, on peut montrer que la distance parcourue par les muons ne devrait être que de quelques centaines de mètre :

$$d = v \cdot \Delta t_p = 0,999\,7 \times 3,00 \times 10^8 \times 2,2 \times 10^{-6} = 660 \text{ m.}$$

2. En raisonnant en physique relativiste :

a. on détermine le coefficient de Lorentz :

$$\gamma = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2} = 1/(1 - 0,999\,7^2)^{1/2} = 40,83.$$

b. $\Delta t_m = \gamma \cdot \Delta t_p = 40,83 \times 2,2 \times 10^{-6} = 90 \mu\text{s}$.

c. Avec une telle durée de vie, les muons atteignent effectivement le sol :

$$d' = v \cdot \Delta t_m = 0,999\,7 \times 3,00 \times 10^8 \times 90 \times 10^{-6} = 27 \text{ km.}$$

27 1. La géolocalisation par GPS exige une mesure précise des durées Δt de propagation des ondes électromagnétiques entre les satellites associés et le GPS, car cela permet une précision des mesures de distances qui en découlent et qui permettent la localisation par triangulation.

2. On peut montrer que dans le cas de la géolocalisation GPS, il faut prendre en compte les effets de la dilatation du temps prévus par la théorie de la relativité d'Einstein. En effet, dans ce cas, γ est légèrement différent de 1 et cet écart est décelable par les horloges atomiques :

$$\gamma = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2} = 1/(1 - (3\,874/(3,00 \times 10^8))^2)^{1/2} = 1,000\,000\,000\,083\,4.$$

3. On peut déterminer l'écart de temps qu'il peut exister entre une horloge présente dans le GPS et une horloge d'un satellite au bout d'un jour mesuré sur Terre :

$$1 \text{ j} = 3\,600 \times 24 = 86\,400 \text{ s.}$$

Donc sur un jour, l'écart est de :

$$0,000\,000\,000\,083\,4 \times 86\,400 = 0,000\,007\,20 \text{ s} = 7,20 \mu\text{s}.$$

28 1. Dans le référentiel d'un méson, la distance moyenne parcourue par la particule avant désintégration est de :

$$d = v \cdot \Delta t_p = 0,999\,999 \times 3,00 \times 10^8 \times 2,6 \times 10^{-8} = 7,8 \text{ m.}$$

2. $\gamma = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2} = 1/(1 - 0,999\,999^2)^{1/2} = 707,107$.
Donc la durée mesurée de la vie moyenne d'un méson est :

$$\Delta t_m = \gamma \cdot \Delta t_p = 707,107 \times 2,6 \times 10^{-8} = 1,8 \times 10^{-5}.$$

Dans le référentiel du laboratoire, la distance moyenne parcourue par la particule avant désintégration est de :

$$d' = v \cdot \Delta t_m = 0,999\,999 \times 3,00 \times 10^8 \times 1,8 \times 10^{-5} = 5\,400 \text{ m} = 5,4 \text{ km.}$$

29 On cherche à déterminer la durée écoulée entre le départ du vaisseau de la Terre et le moment où le missile explose.

1. Pour le missile :

$$\Delta t = (\Delta t \text{ trajet})_{\text{propre}} + (\Delta t \text{ détonateur})_{\text{propre}} = 30,0 + 5,50 = 35 \text{ min } 30 \text{ s.}$$

2. Pour le pilote présent dans le vaisseau spatial :

$$\Delta t = (\Delta t \text{ trajet})_{\text{propre}} + (\Delta t \text{ détonateur})_{\text{mesuré}} = (\Delta t \text{ trajet})_{\text{propre}} + \gamma \text{ détonateur/vaisseau}$$

$$\gamma \text{ détonateur/vaisseau} = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2} = 1/(1 - 0,60^2)^{1/2} = 1,25.$$

$$\Delta t' = 30,0 + 1,25 \times 5,50 = 36 \text{ min } 50 \text{ s.}$$

3. Pour le centre spatial terrestre :

$$\Delta t = (\Delta t \text{ trajet})_{\text{mesuré}} + (\Delta t \text{ détonateur})_{\text{mesuré}} = \gamma \text{ trajet/Terre} \times (\Delta t \text{ trajet})_{\text{propre}} + \gamma \text{ détonateur/Terre}$$

$$\times (\Delta t \text{ détonateur})_{\text{propre}}$$

$$\gamma \text{ trajet/Terre} = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2} = 1/(1 - 0,20^2)^{1/2} = 1,7$$

$$\gamma \text{ détonateur/Terre} = 1/(1 - (v/c)^2)^{1/2} = 1/(1 - 0,80^2)^{1/2} = 1,02$$

$$\Delta t'' = 30,0 \times 1,02 + 5,50 \times 1,7 = 30,6 + 9,35 = 40 \text{ min.}$$

EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

30 1. a. Le « coefficient de dilatation du temps » correspond au coefficient de Lorentz.

b. Le coefficient de contraction des longueurs est l'inverse du coefficient de dilatation du temps :

$$\Delta = 1/\gamma = (1 - (v/c)^2)^{1/2}.$$

c. $L_m = \delta \cdot L_p$.

2. On cherche la « très grande vitesse » évoquée dans le texte qui permettrait à une échelle de 25 mètres de rentrer dans une grange de 20 mètres :

$$L_p = 25 \text{ m}$$

$$L_m = 20 \text{ m}$$

$$\text{donc } \delta = 0,80$$

$$\text{donc } (1 - (v/c)^2)^{1/2} = 0,80$$

$$\text{soit } v = 0,60 \times c = 1,80 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

3. La perception du fermier et celle de la fourmi sont différentes, car la fourmi présente sur l'échelle perçoit la longueur propre de l'échelle tandis que le fermier perçoit la longueur mesurée.

Cinétique chimique

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
<ul style="list-style-type: none"> - Réactions lentes, rapides ; durée d'une réaction chimique. - Facteurs cinétiques. - Évolution d'une quantité de matière au cours du temps. - Temps de demi-réaction. <ul style="list-style-type: none"> - Catalyse homogène, hétérogène et enzymatique. 	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour suivre dans le temps une synthèse organique par CCM et en estimer la durée.</i> - <i>Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour mettre en évidence quelques paramètres influençant l'évolution temporelle d'une réaction chimique : concentration, température, solvant.</i> - Déterminer un temps de demi-réaction. - <i>Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour mettre en évidence le rôle d'un catalyseur.</i> - Extraire et exploiter des informations sur la catalyse, notamment en milieu biologique et dans le domaine industriel, pour en dégager l'intérêt.

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Suivre l'évolution dans le temps d'une réaction chimique.
2. Connaître quelques paramètres influençant l'évolution temporelle d'une réaction chimique.
3. Mettre en évidence le rôle d'un catalyseur.

Évaluation diagnostique

p. 232

SITUATION 1

Il est des technologies que nous utilisons au quotidien qui empruntent à la catalyse : four du même nom, pot catalytique. De la même façon, nombre d'espèces qui fondent les produits manufacturés sont produites par des réactions catalysées : elles ont été déclenchées ou accélérées par une espèce chimique introduite dans le milieu à cet effet : un catalyseur.

C'est sur ces questions que les **activités 1** et **2** proposent des éclairages.

SITUATION 2

La pression des gaz, air et vapeur d'eau, présents dans l'enceinte d'un autocuiseur est supérieure à la pression atmosphérique. De fait, la température d'ébullition de l'eau est supérieure à 100 °C. Les aliments y cuisent donc plus rapidement. Y a-t-il d'autres paramètres qui influencent la durée d'une réaction chimique ?... C'est la réflexion que propose de conduire l'**activité 3**.

SITUATION 3

La chromatographie, abordée en classes de 2^{de} et de 1^{re}, est une technique qui permet de séparer et d'identifier par comparaison les espèces chimiques constitutives d'un mélange généralement homogène. Elle permet donc de s'assurer de la formation ou de la disparition d'une espèce chimique d'un milieu à une date donnée et par là même, comme le présente l'**activité 4**, de suivre l'évolution au cours du temps d'une réaction chimique.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

Autour de la catalyse

p. 234

1. Un catalyseur est une espèce chimique qui est susceptible d'accélérer une réaction cinétiquement inerte, ou de modifier la durée d'évolution d'un système chimique, mais qui n'est pas elle-même consommée lors de cette réaction. La catalyse permet encore d'orienter l'évolution d'un système vers une réaction, lorsqu'il est susceptible d'être le siège de réactions concurrentes.

2. Une enzyme est un biocatalyseur, c'est-à-dire un catalyseur d'origine biologique.

3. Lors d'une synthèse industrielle ou au laboratoire, la catalyse permet généralement d'accélérer les processus et d'améliorer la sélectivité des réactions.

4. La synthèse de l'ammoniac, tout comme le traitement et la valorisation des pétroles, utilisent la catalyse hétérogène.

5. La catalyse homogène peut être définie comme un processus dans lequel le catalyseur et le milieu réactionnel sont dans le même état physique.

6. Dans ce cas, le catalyseur utilisé « modifie les données du jeu et donc oriente vers un résultat plutôt qu'un autre » : c'est donc la sélectivité du catalyseur qui est mise en évidence.

7.

Procédés ou synthèses	Type de catalyse	Catalyseur
Craquage	Hétérogène	Zéolithes
Reformage	Hétérogène	Pt-Al ₂ O ₃
Synthèse de l'ammoniac	Hétérogène	Fer associé à de faibles quantités d'oxydes métalliques ou ruthénium sur support de graphite
Dimérisation des oléfines	Homogène	Selon la sélectivité souhaitée : trialkyl aluminium ou complexe du nickel
Synthèse du styrène	Hétérogène	Fe ₂ O ₃

8. On peut légitimement penser que l'industrie chimique poursuit deux objectifs : produire au moindre coût tout en préservant la santé des opérateurs et des utilisateurs ainsi que l'environnement. En cela, « la catalyse nous permet de trouver des solutions pour élaborer plus efficacement les molécules que nous utilisons, en économisant les matières premières, l'énergie et réduisant de fait notre impact sur l'environnement ». Ainsi, la chimie verte, concept développé dans la Partie 5, séquence 2, emprunte beaucoup à la catalyse.

ACTIVITÉ 2

Les enzymes : des biocatalyseurs ?

p. 235

1. L'amidon est obtenu par polycondensation de molécules de glucose.



3. Le glucose et le maltose (les sucres réducteurs) sont mis en évidence par le précipité rouge d'oxyde de cuivre qu'ils forment en réagissant à chaud avec de la liqueur de Fehling. L'amidon est quant à lui mis en évidence par de l'eau iodée : en sa présence, elle prend une coloration violette ou noire selon sa concentration dans le milieu.

5. Voir expérience.

6. Ces réactions sont réalisées à 37 °C, température du corps humain, afin de modéliser au mieux, la réalité des réactions catalytiques étudiées.

7. La réaction entre l'amidon et l'eau est cinétiquement inerte, même à 37 °C.

8. Le test positif à la liqueur de Fehling montre que l'acide chlorhydrique est un catalyseur de réaction. En sa présence, l'hydrolyse de l'amidon a eu lieu : on parle d'hydrolyse acide.

9. La solution d'amylase catalyse l'hydrolyse de l'amidon comme l'attestent les résultats expérimentaux qui révèlent la présence de maltose : il s'agit d'une catalyse enzymatique. En sa présence, l'hydrolyse de l'amidon est notablement accélérée, beaucoup plus qu'elle ne l'est lors d'une catalyse acide comme le montrent les résultats comparés des tubes 2 et 3 à la date $t = 2$ min.

10. Une enzyme est un catalyseur biochimique dans la mesure où elle est généralement une protéine issue du monde du vivant.

11. Dans la mesure où la salive permet l'hydrolyse de l'amidon elle contient nécessairement de l'amylase.

ACTIVITÉ 3

Facteurs cinétiques

p. 236

1. C'est la formation du soufre colloïdal, puis du précipité de soufre qui permet de suivre l'évolution au cours du temps du système chimique considéré.

2. Dans la mesure où l'on apprécie à l'œil nu la disparition comparée d'un motif à travers une colonne de liquide, il convient de maintenir cette colonne de liquide identique d'une expérience à une autre : soit conserver des béchers de même section et y introduire le même volume de liquide.

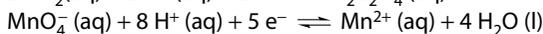
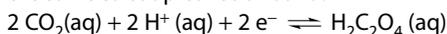
3. On a :

$$[H_3O^+]_{\text{initial}} = \frac{c_2 \cdot V_2}{(V_1 + V_2 + V_{\text{eau}})}$$

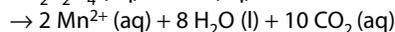
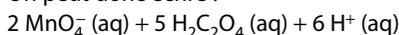
$$\text{et } [S_2O_3^{2-}]_{\text{initial}} = \frac{c_1 \cdot V_1}{(V_1 + V_2 + V_{\text{eau}})}$$

V ₁ (mL)	V ₂ (mL)	V _{eau} (mL)	[H ₃ O ⁺] _{initial}	[S ₂ O ₃ ²⁻] _{initial}	Δt (s)
40	10	0	0,20 mol · L ⁻¹	8,0 × 10 ⁻² mol · L ⁻¹	
20	10	20	0,20 mol · L	4,0 × 10 ⁻² mol · L ⁻¹	
10	10	30	0,20 mol · L	2,0 × 10 ⁻² mol · L ⁻¹	

4. Les demi-équations d'oxydoréduction associées à chacun des couples redox sont :

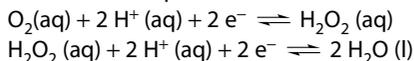


On peut donc écrire :

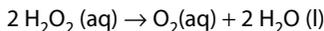


5. Le milieu réactionnel, violet du fait de la présence de l'ion permanganate en solution, se décolore progressivement.

6. Les demi-équations d'oxydoréduction associées à chacun des couples redox sont :



On peut donc écrire :



7. On peut observer un dégagement gazeux de dioxygène qui témoigne de l'avancement de la réaction.

8. À l'état final du système chimique, le test à la soude nous montre, par le précipité vert formé, que les ions fer (II), introduits à l'état initial du système, sont toujours présents.

9. Les résultats expérimentaux mettent en évidence trois paramètres qui influencent la durée d'évolution d'un système chimique :

- la concentration en réactif : lorsque la concentration en réactif augmente, la durée d'évolution du système chimique, siège de la réaction considérée, diminue ;
- la température du système chimique : lorsque la température du système chimique augmente, sa durée d'évolution pour passer de son état initial à son état final diminue ;
- la présence d'un catalyseur : un catalyseur de réaction, ajouté au système chimique dans son état initial, favorise la réaction dont il est le siège, ce qui conduit à réduire sa durée d'évolution entre son état initial et son état final. Le catalyseur n'est d'ailleurs pas affecté par la réaction dans la mesure où on le retrouve inchangé à l'état final du système.

ACTIVITÉ 4

Suivi d'une réaction lente

p. 237

1. La température est un facteur cinétique qui influence la durée d'une réaction. Élever la température conduit donc à diminuer la durée d'évolution du système chimique entre son état initial et son état final.

2. L'usage d'un catalyseur permettrait également d'accélérer la réaction chimique. Toutefois, dans le cas présent, l'acide sulfurique étant une solution aqueuse, l'anhydride acétique réagirait avec l'eau pour se transformer en acide acétique, l'état final du système chimique en serait modifié.

3. Le sous-produit de cette réaction est l'acide éthanóique qui apparaît également sur le chromatogramme sous la forme d'une tache.

$$n_{(\text{CH}_3\text{CO})_2\text{O}} = \frac{m_{(\text{CH}_3\text{CO})_2\text{O}}}{M((\text{CH}_3\text{CO})_2\text{O})} = \frac{\rho_{(\text{CH}_3\text{CO})_2\text{O}} \cdot V_{(\text{CH}_3\text{CO})_2\text{O}}}{M((\text{CH}_3\text{CO})_2\text{O})}$$

$$\text{soit } n_{(\text{CH}_3\text{CO})_2\text{O}} = \frac{1,08 \times 15 \times 10^{-3}}{102} = 1,6 \times 10^{-4} \text{ mol}$$

et

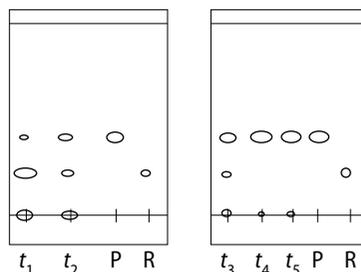
$$n_{\text{alcool}} = \frac{m_{\text{alcool}}}{M(\text{alcool})} = \frac{\rho_{\text{alcool}} \cdot V_{\text{alcool}}}{M(\text{alcool})}$$

$$\text{soit } n_{\text{alcool}} = \frac{1,04 \times 12 \times 10^{-3}}{108} = 1,2 \times 10^{-4} \text{ mol.}$$

En regard de la stœchiométrie de la réaction d'estérification, l'alcool benzylique est le réactif limitant.

5. Les dépôts R et P permettent d'apprécier l'avancement de la réaction. Après élution et par comparaison avec le dépôt correspondant au système chimique à la date considérée, il est possible de vérifier la présence ou l'absence de l'alcool benzylique et de l'éthanoate de benzyle dans le système.

6. On peut observer sur le chromatogramme que le système chimique évolue au cours du temps : jusqu'à la date t_3 , réactifs et produits coexistent ; à partir de la date t_4 , un des réactifs a été totalement consommé.



7. À la date t_5 , le chromatogramme montre que l'alcool benzylique a totalement disparu : c'est donc bien le réactif limitant.

8. À partir de la date t_4 , l'alcool benzylique a disparu du chromatogramme. L'état final du système est donc atteint.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : Suivre l'évolution dans le temps d'une réaction chimique

1. 1. a. *Faux*. Une réaction est dite rapide si elle se déroule en moins de $1/10$ s, durée de la persistance rétinienne.

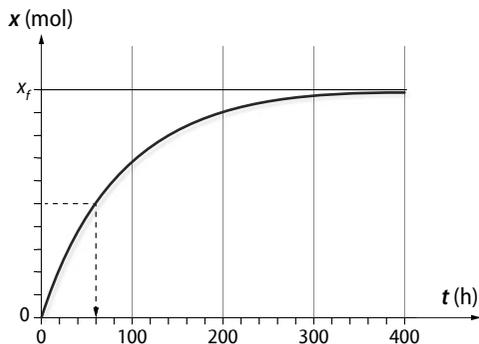
2. *Faux*. Un système cinétiquement inerte est le siège d'une réaction chimique infiniment lente.

3. *Vrai*.

4. *Faux*. Le temps de demi-réaction est la durée nécessaire pour que l'avancement de la réaction atteigne la moitié de sa valeur finale.

2. 1. Le temps de demi-réaction est la durée au terme de laquelle l'avancement de la réaction est égal à la moitié de l'avancement final.

2. À la date $t = t_{1/2}$, on a $x(t_{1/2}) = x_f/2$.
Graphiquement, on lit $t_{1/2} = 60$ h.



3. Relativement au temps de demi-réaction de sa décomposition, au terme d'une durée égale à 12 h, le salicylate de méthyl n'est pratiquement pas dégradé. Cette crème solaire est donc parfaitement adaptée à une exposition de l'ordre d'une demi-journée.

3 L'airbag

Un airbag est constitué d'une enveloppe flexible, qui peut se remplir de diazote gazeux en cas de choc. Ce gaz résulte essentiellement de la composition thermique de l'azote de sodium (NaN_3) en diazote et en sodium métallique.

1. Écrire l'équation associée à la décomposition de l'azote de sodium à 300 °C.



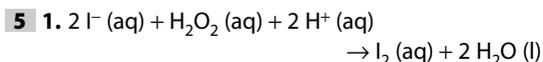
2. Cette réaction est-elle rapide ou lente ? Justifier.

Cette réaction est nécessairement rapide : il convient que l'airbag se gonfle dès le choc enregistré par l'accéléromètre qui en commande le déclenchement.

4 1. D'après le tableau, l'état final est atteint à la date $t = 400$ s.

2. a. Graphiquement, on obtient $t_{1/2} = 60$ s.

b. L'état final du système chimique est atteint au terme d'une durée environ égale à 6,5 fois le temps de demi-réaction.



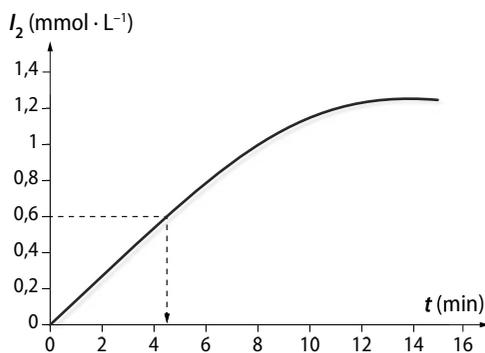
2. C'est la coloration du milieu réactionnel en jaune orangé, puis brun au fur et à mesure de la formation du diiode.

3. $n(\text{I}^-) = c_1 \cdot V_1 = 5,00 \times 10^{-3} \times 5,00 \times 10^{-3} = 2,50 \times 10^{-5} \text{ mol}$.

$n(\text{H}_2\text{O}_2) = c_2 \cdot V_2 = 5,00 \times 10^{-3} \times 2,50 \times 10^{-2} = 7,50 \times 10^{-5} \text{ mol}$.

En regard de la stœchiométrie de la réaction, les ions iodure sont limitants et $x_m = 1,25 \times 10^{-5} \text{ mol}$.

4.



5. À la date 14 min, $[\text{I}_2] = 1,25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ soit :

$$n(\text{I}_2) = [\text{I}_2] \cdot V = 1,25 \times 10^{-3} \times 10 \times 10^{-3} = 1,25 \times 10^{-5} \text{ mol} = x_m$$

L'état final du système chimique est donc atteint à cette date.

6. Graphiquement, $t_{1/2} = 4,5$ min.

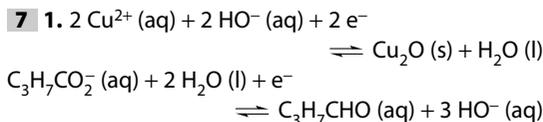
COMPÉTENCE 2 : Connaître quelques paramètres influençant l'évolution temporelle d'une réaction

6 1. Faux. Cela peut aussi revenir à augmenter la durée d'évolution.

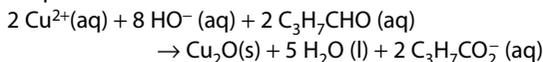
2. Vrai.

3. Vrai.

4. Vrai.



On peut donc écrire :



2. C'est la formation du précipité rouge d'oxyde de cuivre qui nous renseigne sur l'avancement de la réaction, et donc l'évolution temporelle du système chimique.

3. Comme l'attestent les résultats expérimentaux, cette réaction est lente à température ambiante (milieu toujours bleu si maintenu à 20 °C) et est accélérée (apparition du précipité quand le milieu est porté à 40 °C ou à ébullition) lorsque l'on chauffe le milieu réactionnel.

4. Le butanal est sujet à l'oxydation par le dioxygène de l'air. La température est un facteur cinétique : abaisser la température conduit à ralentir la réaction chimique dont est le siège un système. Placer au réfrigérateur le beurre permet donc de ralentir la réaction d'oxydation dont il est l'objet.

8 1. C'est le dégagement gazeux de dihydrogène qui nous renseigne sur l'avancement de la réaction, et donc l'évolution temporelle du système chimique.

2. L'état de division d'un réactif est un facteur cinétique : plus le réactif est divisé (poudre, grenaille, fil ou plaque), plus la durée d'évolution du système chimique entre son état initial et son état final est courte. À l'échelle microscopique, la division revient à la multiplication des lieux de réaction. L'état final est atteint plus rapidement sur la courbe **a** qu'il ne l'est sur la courbe **b** : à la courbe **a** correspond donc le zinc le plus divisé, soit la poudre, à la courbe **b**, la grenaille.

COMPÉTENCE 3 : Mettre en évidence le rôle d'un catalyseur

10 1. a et c.

Il est à noter que certains catalyseurs notamment biochimiques sont des inhibiteurs de réactions.

2. c.

3. a et b.

4. a.

11 1. L'avancement final de la réaction considérée correspond à l'asymptote horizontale de la courbe **a**, soit $x_f = 0,66$ mol.

2. Un catalyseur est une espèce chimique qui accélère ou oriente une réaction chimique sans modifier l'état final du système chimique.

3. L'acide sulfurique est un catalyseur adapté à la réaction d'estérification. En modifiant le pH du solvant, il favorise la réaction.

4. En ajoutant un catalyseur dans le milieu réactionnel, l'état final du système chimique demeure inchangé mais est atteint plus rapidement : c'est donc la courbe **b** qui traduirait l'évolution d'un tel système au cours du temps.

12 1. $2 \text{H}_2\text{O}_2 (\text{aq}) \rightarrow \text{O}_2 (\text{aq}) + 2 \text{H}_2\text{O} (\text{l})$.

2. a. La catalyse par le platine est une catalyse hétérogène : catalyseur et réactif ne sont pas dans le même état physique.

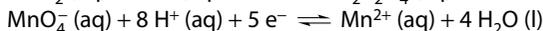
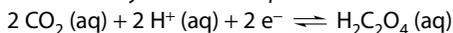
b. L'état final du système chimique est atteint plus rapidement lorsque la catalyse est enzymatique.

13 Une réaction autocatalytique

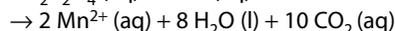
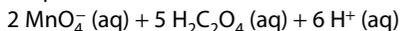
En milieu acide, les ions permanganate $\text{MnO}_4^- (\text{aq})$ oxydent lentement l'acide oxalique $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4 (\text{aq})$.

On prépare une même solution dans deux béchers distincts, puis l'on ajoute une spatule de sulfate de manganèse $\text{MnSO}_4 (\text{s})$ au second bécher. La coloration violette de la solution disparaît alors plus rapidement.

1. Écrire les demi-équations redox, puis l'équation de la réaction d'oxydoréduction qui se déroule.

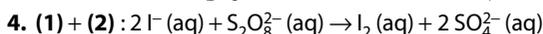
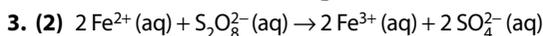
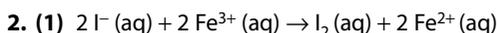
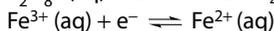
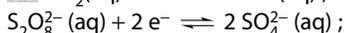
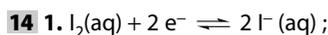


On peut donc écrire :



2. On dit de cette réaction qu'elle est « autocatalytique ». Expliquer pourquoi.

Si la coloration violette disparaît plus rapidement dans le bécher dans lequel on ajoute une pointe de spatule de dioxyde de manganèse, c'est que ce dernier catalyse la réaction de réduction des ions permanganate. Dans la mesure où les ions manganèse sont produits par cette réaction de réduction, on peut donc penser qu'elle est autocatalysée par l'un de ses produits de réaction.



On retrouve bien l'équation de la réduction des ions peroxodisulfate par les ions iodure.

5. Un catalyseur, en catalyse homogène, participe activement à la réaction qu'il catalyse. Pour autant, dans la mesure où il y est produit dans les mêmes proportions qu'il y est consommé, il ne figure pas dans son bilan.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

15 1. Les catalyseurs utilisés dans un pot catalytique « facilitent leur réaction (celles relatives aux gaz d'échappement) sans pour autant y participer »

2. Le platine, le rhodium et le palladium sont utilisés dans un pot catalytique.

3. Il s'agit d'une catalyse hétérogène, les catalyseurs étant des solides déposés sur une céramique en nid d'abeille, et les réactifs des gaz.

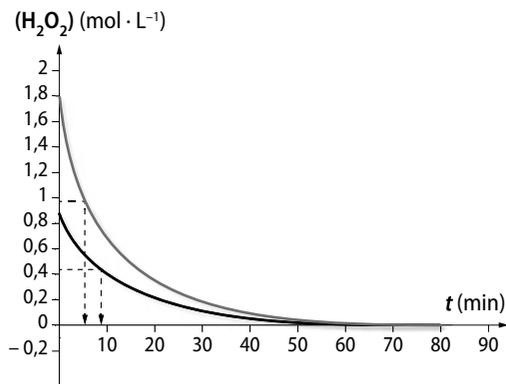
4. Les réactions entre les gaz d'échappement, catalysés par le pot, nécessitent de haute température pour se produire efficacement. D'autre part, le plomb, adjuvant de certains carburants, se dépose sur le catalyseur et diminue notablement son efficacité.

16 1. $\text{H}_2\text{O}_2 (\text{aq}) / \text{H}_2\text{O} (\text{l})$

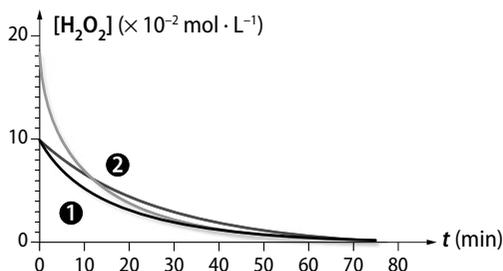
2. La décomposition de l'eau oxygénée à température ambiante est une réaction lente : on peut constater que la diminution de la concentration en eau oxygénée dans le milieu s'inscrit dans la durée. Ce n'est en effet qu'au terme d'une soixantaine de minutes que sa

concentration s'annule, ce qui témoigne d'autre part du caractère total de cette réaction.

3. Lorsque la concentration en eau oxygénée augmente, le temps de demi-réaction et donc la durée d'évolution du système chimique sont diminués.



4. La température étant un facteur cinétique, elle influence la durée d'évolution du système chimique. En diminuant la température, on augmente la durée d'évolution du système.



17 1. L'acide sulfurique est un catalyseur de réaction.

2. Le montage à reflux permet d'augmenter la température du milieu réactionnel et donc de diminuer la durée de son évolution sans perdre aucun réactif ou produit.

3. La réaction considérée est lente. Pour autant, la connaissance du système chimique, à une date donnée, nécessite de stopper l'évolution de ce système à cette date. On procède donc à son refroidissement.

4. Le prélèvement ① laisse apparaître le seul acide salicylique. Celui-ci ayant disparu dans le prélèvement ③, on peut considérer que l'état final est certainement atteint à la date $t = 15$ min.

18 1. Le diiode confère une coloration orangée aux solutions qui le contiennent. Sa disparition progressive pourra donc être suivie par spectrophotométrie.

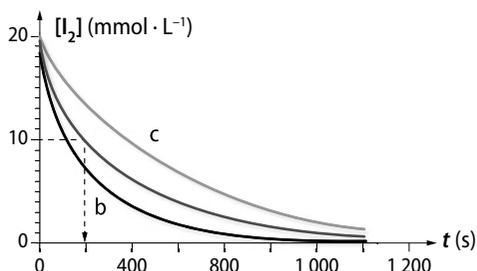
2. Graphiquement, on lit $t_{1/2} = 180$ min.

3. La température étant un facteur cinétique, elle influence la durée d'évolution du système chimique.

En l'augmentant, on diminue la durée d'évolution du système (courbe **b**).

$$4. a. C' = \frac{C_0 \cdot V}{V'} = \frac{2,0 \times 10^{-2} \times 50}{100} = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

b. La concentration étant un facteur cinétique, elle influence la durée d'évolution du système chimique. En la diminuant, on augmente la durée d'évolution du système (courbe **c**).



19 1. La température est un facteur cinétique : lorsque la température augmente, la durée d'évolution du système chimique entre son état initial et son état final diminue. Un bain à 40°C permet donc de diminuer la durée d'évolution du système considéré.

2. a. La concentration en réactif est un facteur cinétique ; lorsqu'elle augmente, la durée d'évolution du système chimique de son état initial à son état final diminue. Le système (2) évoluera donc plus rapidement vers son état final que le système (1).

b. Soit le système (1) :

$$n(\text{I}^-) = c_1 \cdot V_1 = 5,0 \times 10^{-1} \times 20,0 \times 10^{-3} = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol.}$$

$$n(\text{S}_2\text{O}_8^{2-}) = c_2 \cdot V_2 = 1,0 \times 10^{-1} \times 20 \times 10^{-3} = 2,0 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

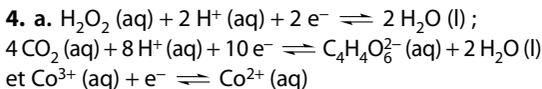
En regard de la stœchiométrie de la réaction, les ions peroxodisulfate sont limitants.

Dans le système (2), les ions iodure seront introduits dans un plus large excès. L'état final, conditionné par la quantité de matière initiale du réactif limitant, demeure donc inchangé.

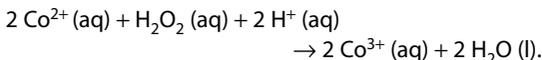
20 1. Une réaction est lente si l'évolution temporelle de l'un des paramètres physiques du milieu réactionnel, par exemple la couleur, peut être suivie à l'œil nu ou avec un appareil de mesure dédié (un spectrophotomètre).

2. Les ions cobalt (III) confèrent aux solutions aqueuses qui les contiennent une coloration verte, un suivi spectrophotométrique dans le domaine du visible est donc adapté au suivi temporel de leur concentration dans le système considéré.

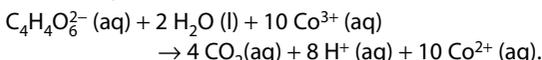
3. Dans les zones ① et ⑤, en regard de la faible concentration en ions cobalt (III), on peut considérer que la coloration du milieu est rose. En revanche, dans la zone ③, où la concentration en ion cobalt (III) est maximale, la couleur de la solution sera verte.



Dans la zone ②, les ions cobalt (II) sont oxydés nécessairement par l'eau oxygénée, selon :



Dans la zone ④, les ions cobalt (III) sont réduits nécessairement par les ions tartrate, selon :



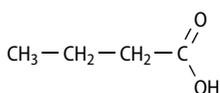
b. La réaction d'oxydation des ions cobalt (II) est plus rapide que la réaction de réduction des ions cobalt (III) comme l'atteste la variation de la concentration en ions cobalt (III) dans le milieu, qui augmente rapidement au cours du temps dans la zone ② et diminue lentement dans la zone ④.

5. La concentration en ions cobalt (III) est nulle à l'état initial du système et tend vers cette même valeur à l'état final. Si, au cours d'une étape de la transformation l'oxydation des ions cobalt (II) a permis leur formation, une autre étape a vu leur consommation.

6. Un catalyseur n'influence pas l'état final du système chimique. La quantité de matière de dioxyde de carbone produite est donc identique avec ou sans catalyseur.

7. La catalyse est qualifiée d'homogène puisque catalyseur et réactif sont dans le même état physique.

21 1. L'acide butanoïque est un acide carboxylique et le méthanol un alcool de formules développées respectives



et $\text{CH}_3 - \text{OH}$

2. En regard de la stœchiométrie de la réaction, on peut écrire :

$$n_{\text{C}}(t) = x(t)$$

$$\text{et } n_{\text{A}}(t) = n_{\text{A}}(0) - x(t)$$

$$\text{donc } n_{\text{C}}(t) = n_{\text{A}}(0) - n_{\text{A}}(t).$$

3. a. La courbe « verte », puisque croissante, figure l'évolution de la quantité de matière de butanoate de méthyle au cours du temps.

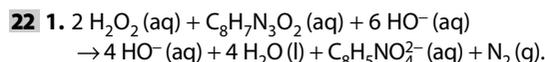
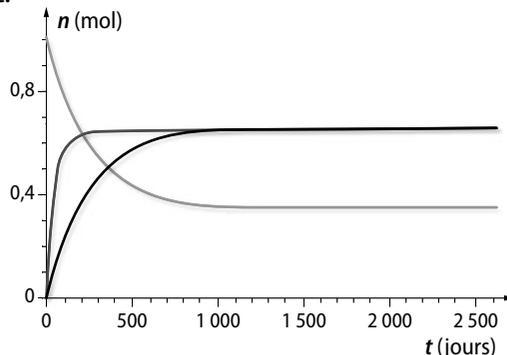
b. Graphiquement, l'état final correspond à l'asymptote horizontale à la courbe « verte ». On peut considérer qu'il est atteint à la date 1 500 jours. L'avancement final est $x_f = 0,67$ mol.

c. Le temps de demi-réaction est la durée nécessaire pour que l'avancement de la réaction atteigne la moitié de sa valeur finale. $x(t_{1/2}) = 0,33$ mol, soit $t_{1/2} = 140$ jours.

4. a. À température ambiante, cette réaction est beaucoup trop lente pour présenter un quelconque intérêt industriel.

b. Pour écourter la durée de cette synthèse, on peut ajouter au milieu réactionnel un catalyseur de réaction ou travailler à température plus élevée.

c.



2. Le dégagement gazeux de diazote.

3. D'après la loi des gaz parfaits, on peut écrire :

$$n_{\text{air}} = \frac{P_0 \cdot V_{\text{gaz}}}{R \cdot T}.$$

4. a. $P = \frac{(n_{\text{air}} + n_{\text{N}_2}) \cdot R \cdot T}{V_{\text{gaz}}}$

b. $P - P_0 = \frac{(n_{\text{air}} + n_{\text{N}_2}) \cdot R \cdot T}{V_{\text{gaz}}} - \frac{n_{\text{air}} \cdot R \cdot T}{V_{\text{gaz}}}$
 $= \frac{n_{\text{N}_2} \cdot R \cdot T}{V_{\text{gaz}}}$

5. $n(\text{luminol}) = \frac{m(\text{luminol})}{M(\text{luminol})} = \frac{1,0}{177}$
 $= 5,7 \times 10^{-3}$ mol.

$n(\text{H}_2\text{O}_2) = c \cdot V = 5,6 \times 0,50 \times 10^{-3} = 2,8 \times 10^{-3}$ mol.

En regard de la stœchiométrie de la réaction, le peroxyde d'hydrogène est le réactif limitant et :

$$x_{\text{max}} = 1,4 \times 10^{-3}$$
 mol.

6. a. En regard de la stœchiométrie de la réaction :

$$x(t) = n_{\text{N}_2}(t).$$

On a donc $x(t) = \frac{(P - P_0) \cdot V_{\text{gaz}}}{R \cdot T}.$

b. $x_{\text{max}} = \frac{1\,660 \times 2,1 \times 10^{-3}}{8,314 \times 300} = 1,4 \times 10^{-3}$ mol.

7. Graphiquement, on lit $t_{1/2} = 3,0$ s.

8. Un catalyseur est une espèce chimique qui accélère ou oriente une réaction chimique sans modifier l'état final du système chimique qui en est le siège.

9. L'hémoglobine transporte des ions fer (II). Des traces de sang sont donc susceptibles de catalyser la réaction entre l'eau oxygénée et le luminol : l'émission de lumière bleutée révèle leur présence.

EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

23 1. La seule espèce susceptible d'absorber de la lumière dans le domaine du visible est l'ion permanganate, qui confère aux solutions aqueuses qui le contiennent une coloration violette. On a donc $A = k [\text{MnO}_4^-]$.

2. La courbe $A = f(t)$ s'annule à la date $t = 500$ s. Comme l'implique la relation ci-dessus, l'espèce responsable de l'absorbance a donc totalement disparu. L'ion permanganate est de fait le réactif limitant.

3. En regard de la stœchiométrie de la réaction, on a :

$$x_f = \frac{c_1 \cdot V_1}{2} = \frac{9,5 \times 10^{-4} \times 1,00 \times 10^{-3}}{2} = 4,8 \times 10^{-7} \text{ mol}$$

comme l'atteste par ailleurs la courbe $x = f(t)$.

4. En regard de la stœchiométrie de la réaction, on peut écrire que :

$$n(\text{Mn}^{2+}) = 2 x_f = 2 \times 4,8 \times 10^{-7} = 9,6 \times 10^{-7} \text{ mol.}$$

Or, on sait :

$$[\text{Mn}^{2+}] = \frac{n(\text{Mn}^{2+})}{V_1 + V_2} = \frac{9,6 \times 10^{-7}}{2,00 \times 10^{-3}} = 4,8 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

5. À la date t , la vitesse volumique de réaction est proportionnelle (de facteur $1/V$ avec $V = V_1 + V_2$) au coeffi-

cient directeur de la tangente (dx/dt) à la courbe $x = f(t)$ à cette même date. À volume constant, l'évolution au cours du temps des coefficients directeurs des tangentes successives à cette courbe nous indique l'évolution temporelle de la vitesse volumique de réaction.

6. La concentration en réactif est un facteur cinétique : la vitesse volumique de réaction augmente quand la concentration en réactif augmente, ce qui implique que la durée d'évolution du système entre son état initial et son état final diminue.

7. Jusqu'à la date $t = 330$ s, la vitesse volumique de réaction augmente, comme l'attestent les valeurs croissantes des coefficients directeurs des tangentes à la courbe jusqu'à cette date. Par la suite, la vitesse volumique de réaction diminue jusqu'à s'annuler à partir de $t = 500$ s. Le fait que la vitesse volumique de réaction augmente dans un premier temps va à l'encontre de la réponse à la question 6. En effet, la concentration en réactif dans le milieu diminue continuellement au cours de la réaction, il devrait en être de même de la vitesse de réaction.

8. Si l'un des produits de cette réaction est un catalyseur de cette réaction, alors il est envisageable d'un point de vue cinétique, que dans un premier temps, la catalyse l'emporte sur la diminution de la concentration en réactif... par la suite, c'est l'inverse qui se produit, la catalyse ne peut compenser la disparition des réactifs et la baisse de leur concentration respective.

1 A. 1. a. Le mouvement du palet sera étudié dans un référentiel terrestre supposé galiléen.

b. Le système est le palet. Il est un système pseudo-isolé quand au départ il est immobile et donc son vecteur quantité de mouvement est nul.

Les actions mécaniques qui s'exercent sur lui se compensent.

On peut écrire $\vec{R} + \vec{P} = \vec{0}$ avec \vec{R} la force de réaction qui modélise l'action du sol sur le palet et \vec{P} le poids du palet.

2. a. Dans la phase de lancement où le palet subit en plus une action mécanique modélisée par la force \vec{F} , d'après la deuxième loi de Newton, on peut écrire :

$$\vec{F} + \vec{R} + \vec{P} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

Comme d'après **1.b**, $\vec{R} + \vec{P} = \vec{0}$, on en déduit que :

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = m \cdot \vec{a}$$

Comme \vec{F} est constante, l'accélération \vec{a} est aussi constante.

Donc le mouvement du palet est uniformément accéléré.

Comme le vecteur vitesse \vec{v} et le vecteur accélération \vec{a} sont dans la même direction, le mouvement du palet est rectiligne uniformément accéléré.

b. D'après la deuxième loi de Newton, on a :

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = m \cdot \vec{a} \text{ donc } \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{\vec{F}}{m}$$

On projette selon un axe horizontale orienté selon \vec{F} .

On peut donc écrire que $a = \frac{dv}{dt} = \frac{F}{m}$.

On en déduit que $v = \frac{F}{m} \cdot t$.

Donc $v = a \cdot t$.

À $t = t_L$, $v_L = a \cdot t_L$.

Donc $a = \frac{v_L}{t_L}$.

A. N. : $a = \frac{2,1}{3,0} = 0,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

c. $F = m \cdot a$.

A.N. : $F = 20 \times 0,7 = 14 \text{ N}$.

3. Pour $t > 3,0 \text{ s}$, l'action mécanique du joueur modélisée par \vec{F} ne s'applique plus.

Les actions mécaniques qui s'exercent sur le palet se compensent, le palet est donc un système pseudo-isolé et d'après la première loi de Newton, son vecteur quantité de mouvement se conserve : le mouvement du palet est rectiligne uniforme de vitesse $v = v_L = 2,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

B. 1. a. $\Delta E_c = 0 - \frac{1}{2} m \cdot v_L^2$.

A.N. : $\Delta E_c = -\frac{1}{2} \times 20 \times 2,1^2 = -44 \text{ J}$.

b. La variation d'énergie cinétique d'un solide, sur un déplacement AB, est égale à la somme des travaux des forces qui modélisent les actions mécaniques qui agissent sur le solide : $\Delta E_{c(AB)} = \Sigma W_{AB}(\vec{F})$.

2. a. Par définition : $W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \vec{AB}$.

\vec{F} et \vec{AB} sont colinéaires et de sens opposés :

$$W_{AB}(\vec{F}) = -f \cdot AB = -f \cdot d$$

Comme $W_{AB}(\vec{F}) < 0$, le travail est résistant.

b. La force de réaction \vec{R} , qui modélise l'action du sol sur le palet, et le poids \vec{P} du palet sont perpendiculaires à la direction du déplacement, donc leur travail est nul.

3. On a donc $\Delta E_c = -f \cdot d$

donc $f = -\frac{\Delta E_c}{f}$.

A.N. : $f = \frac{44}{40} = 1,1 \text{ N}$.

4. $\vec{R} + \vec{P} + \vec{F}' + \vec{f} = m \cdot \frac{d\vec{p}}{dt}$

$\vec{R} + \vec{P} = \vec{0}$

On projette $F' - f = m \cdot a$.

Donc $F' = m \cdot a + f = F + f$.

A.N. : $F' = 14 + 1,1 = 15 \text{ N}$.

2 1. Enregistrement 1 : condition **B**. Régime pseudo-périodique.

Enregistrement 2 : condition **C**. Régime apériodique.

Enregistrement 3 : condition **A**. Régime périodique.

2. a. Sur l'enregistrement 3, on mesure la durée de 3 périodes sur l'un des enregistrements pour en déduire la valeur d'une période : $3 T_0 = 3,0 \text{ s}$ donc $T_0 = 1,0 \text{ s}$.

b. $F = k \cdot x = m \cdot a$ donc $k = \frac{m \cdot a}{x}$,

donc $[k] = \frac{M \cdot L \cdot T^{-2}}{L} = M \cdot T^{-2}$

et $[m] = M$.

$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$ a donc la dimension de T , donc vrai.

$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{k}{m}}$ a donc la dimension de T^{-1} , donc faux.

$T_0 = 2\pi \frac{m}{k}$ a donc la dimension de T^2 , donc faux.

c. $T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$

donc $k = m \cdot \frac{4\pi^2}{T_0^2}$.

A.N. : $k = 0,100 \times \frac{4\pi^2}{1,0^2} = 4,0 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$.

3. a. $E_p = \frac{1}{2} k \cdot x^2$ et $E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$.

b. $E_m = E_c + E_p$.

c. Dans le cas d'un régime périodique où les frottements sont négligeables, on peut considérer que l'énergie mécanique E_m est constante.

d. À $t = 0$ s, $v(0) = 0$ donc $E_c = 0$.

$$\text{Donc } E_m = E_p = \frac{1}{2} k \cdot x_m^2.$$

A.N. : $E_m = 0,5 \times 4,0 \times 10^2 = 2,0 \times 10^{-2} \text{ J} = 20 \text{ mJ}$.

e. Au passage par la position d'équilibre, $x = 0$.

$$\text{Donc } E_m = E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \text{ donc } v = \sqrt{\frac{2E_m}{m}}.$$

A.N. : $v = \sqrt{\frac{2 \times 20 \times 10^{-3}}{0,100}} = 0,63 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

4. ① énergie mécanique ;

② énergie potentielle ;

③ énergie cinétique.

Dans le cas d'un régime pseudo-périodique, il y a des frottements qui dissipent de l'énergie (travail des forces de frottements).

3 1.



\vec{F} force de poussée

\vec{P} poids

2. D'après la deuxième loi de Newton, $\vec{F} + \vec{P} = m \cdot \vec{a}$.

On projette sur l'axe (Oz) : $F - m \cdot g_0 = m \cdot a$.

$$\text{Donc } a = \frac{F}{m} - g_0.$$

3. a. Au décollage : $a_1 = \frac{F}{m_1} - g_0$.

A.N. : $a_1 = \frac{2445}{208} - 9,8 = 1,95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

b. $a_2 = \frac{F}{m_2} - g_0$

$$m_2 = m_1 - m_{\text{peroxyde d'azote}}$$

A.N. : $m_2 = 208 - 147,5 = 60,5 \text{ tonnes}$.

$$a_2 = \frac{2445}{60,5} - 9,8 = 30,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

c. La valeur de l'accélération n'est pas constante, donc le mouvement n'est pas uniformément accéléré.

La somme des forces est constante mais la masse de la fusée varie, donc la valeur de l'accélération change

au cours du temps. Le mouvement n'est pas uniformément accéléré.

4. a. $v_g = \frac{\Delta t}{\Delta m} \cdot F$

$$[F] = M \cdot L \cdot T^{-2}$$

donc on a $[v_g] = L \cdot T^{-1}$.

v_g a bien la dimension d'une vitesse.

b. En $\Delta t = 145$ s, $|\Delta m| = 147,5$ tonnes.

A.N. : $v_g = \frac{145}{147,5 \times 10^3} \times 2445 \times 10^3 = 2,40 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

c. $\Delta t / \Delta m$ est négatif puisque comme il y a perte de masse, $\Delta m < 0$ donc $\frac{\Delta t}{\Delta m} < 0$.

d. \vec{v}_g est dirigé dans le sens contraire de \vec{F} , donc orienté vers le bas.

5. D'après la troisième loi de Newton ou principe des actions réciproques, donc les moteurs exercent sur les gaz une action mécanique modélisée par une force verticale vers le bas, les gaz exercent sur la fusée une action mécanique modélisée par une force verticale vers le haut de même valeur.

4 1. a. Le référentiel d'étude est le référentiel géocentrique supposé galiléen.

b. Le système d'étude est le satellite.

D'après la deuxième loi de Newton, on peut écrire :

$$d\vec{p}/dt = \vec{F}_{T/S}$$

$$\text{donc } m \cdot d\vec{v}/dt = (G \cdot m \cdot M_T / r^2) \cdot \vec{u}_{ST}$$

$$\text{donc } \vec{a} = (G \cdot M_T / r^2) \cdot \vec{u}_{ST}$$

c. Le vecteur accélération est dirigé vers le centre de la trajectoire circulaire du satellite et le vecteur vitesse est tangent à cette trajectoire : $\vec{v} \cdot \vec{a} = 0$, donc le mouvement du satellite est circulaire uniforme.

2. Dans le cas d'un mouvement circulaire uniforme, la valeur de l'accélération a et celle de la vitesse v sont reliées par la relation : $a = v^2/r$.

D'après ce qui précède, comme le mouvement est circulaire uniforme :

$$a = G \cdot M_T / r^2 = v^2/r.$$

On peut donc en déduire l'expression de la vitesse :

$$v = \sqrt{\frac{G \cdot M_T}{(R_T + h)}}$$

3. D'après le texte, pour $h = 20\,180$ km, on a :

$$v = 14\,000 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}.$$

$$v = \sqrt{\frac{6,67 \times 10^{-11} \times 5,98 \times 10^{24}}{(6\,380 + 20\,180) \times 10^3}} = 3,88 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$= 14,0 \times 10^3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}.$$

Donc la vitesse donnée dans le texte est compatible avec l'altitude.

D'après le texte, pour $h = 20\,180$ km, on a $T = 12$ h.

$$T = \frac{2\pi(R_T + h)}{v} = \frac{2\pi(R_T + h)}{\sqrt{\frac{G \cdot M_T}{R_T + h}}} = 2\pi \sqrt{\frac{(R_T + h)^3}{M_T \cdot G}}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{(6380 \times 10^3 + 20180 \times 10^3)^3}{5,98 \times 10^{24} \times 6,67 \times 10^{-11}}}$$

$$= 4,30 \times 10^4 \text{ s} = 12,0 \text{ h.}$$

Donc la période donnée dans le texte est compatible avec l'altitude.

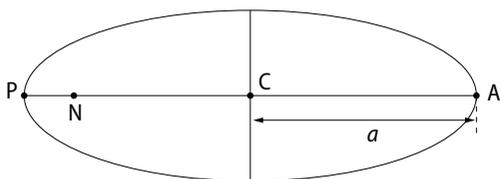
4. Comme la période du satellite n'est pas de 24 h, ce n'est pas un satellite géostationnaire.

5 1. Le référentiel est : c. neptunocentrique.

2. Première loi de Kepler : dans le référentiel neptunocentrique, la trajectoire du satellite Néréide est une ellipse dont le centre de Neptune occupe un des deux foyers.

Deuxième loi de Kepler : le segment reliant Neptune à Néréide balaie des aires égales pendant des durées égales.

3.



4. a. D'après la deuxième loi de Kepler, ces aires sont égales.

b. Les morceaux d'orbite P_1P_2 et A_1A_2 sont parcourus pendant la même durée Δt .

Comme $P_1P_2 > A_1A_2$, $v_P > v_A$.

5. a. Troisième loi de Kepler :

$$\frac{T_{\text{ner}}^2}{a^3} = 4\pi^2 / (G \cdot M) = \text{constante.}$$

$$\text{b. } \frac{T_{\text{rev}}^2}{R_1^3} = \frac{(5,877 \times 86\,400)^2}{3,547 \times 10^5 \times 10^3} = 5,78 \times 10^{-15} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}.$$

c. On peut écrire que (troisième loi de Kepler) :

$$\frac{T_{\text{ner}}^2}{a^3} = \text{cte} = \frac{T_{\text{rev}}^2}{R_1^3}$$

$$\text{donc } T_{\text{ner}}^2 = a^3 \cdot \frac{T_{\text{rev}}^2}{R_1^3}.$$

$$\text{A.N. : } T_{\text{ner}}^2 = (5\,513 \times 10^3)^3 \times 5,78 \times 10^{-15} \text{ donc :}$$

$$T_{\text{ner}} = 360 \text{ jours solaires.}$$

La valeur donnée dans le texte est bien de 360 jours.

6 1. Phénomènes naturels permettant à l'Homme de mesurer l'écoulement du temps :

- alternances des jours et des nuits ;
- alternances des phases de la Lune ;
- alternances des saisons ;

2. « Le skieur a effectué la descente en 76 s ». Concept associé : la durée.

« Le train est entré en gare à 6 h 48 min ». Concept associé : le temps.

Une horloge mesure un temps mais peut aussi mesurer une durée qui est une différence entre deux temps.

3. a. Les qualités du phénomène commandant le fonctionnement d'une horloge :

- phénomène reproductible ;
- phénomène périodique non amorti.

b. Types d'horloges utilisées au cours de l'histoire pour mesurer des intervalles de temps :

- sablier, clepsydre ;
- horloge à balancier, montre à ressort ;
- montre à quartz, horloge atomique.

4. Actuellement, on définit la seconde à partir de la fréquence de transition entre deux niveaux de l'atome de césium 133.

7 Les rayons cosmiques sont constitués de neutrons qui se propagent à une vitesse proche de celle de la lumière : 0,999 999 999 995 \times c.

Leur durée de vie propre est d'environ 1 000 s.

1. a. La durée de vie propre est d'environ $\Delta t_p = 1\,000$ s. La durée mesurée est $\Delta t_m = \gamma \cdot \Delta t_p$ avec $\gamma = 1 / (1 - (v/c)^2)^{1/2}$.

$$\text{A.N. : } \gamma = 1 / (1 - (v/c)^2)^{1/2} = 1 / (1 - 0,999\,999\,999\,995^2)^{1/2} = 10^6.$$

Donc $\Delta t_m = 10^9$ s.

b. On en déduit la distance que peut parcourir un neutron cosmique dans l'espace :

$$d = v \cdot \Delta t_m.$$

$$\text{A.N. : } d = 0,999\,999\,999\,995 \times 3,00 \times 10^8 \times 10^9 = 3,00 \times 10^{17} \text{ m.}$$

2. a. Une année de lumière est la distance parcourue par la lumière en une année :

$$1 \text{ a.l.} = 3,00 \times 10^8 \times 365 \times 24 \times 3\,600 = 9,46 \times 10^{15} \text{ m.}$$

On en déduit la distance que peut parcourir un neutron cosmique dans l'espace en année de lumière :

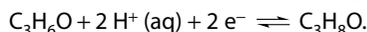
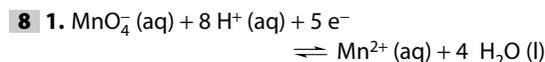
$$d = 3,00 \times 10^{17} = 31,7 \text{ a.l.}$$

Donc un tel neutron peut provenir de l'étoile Alpha du Centaure, étoile la plus proche de la Terre dont la distance est de 4 années de lumière.

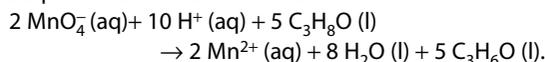
b. Durée du trajet :

- pour un observateur terrestre : environ 4 années ;
- pour le neutron :

$$10^6 \text{ fois moins donc } 4 \times 365 \times 24 \times 3\,600 / 10^6 = 126 \text{ s.}$$



L'équation de la réaction étudiée s'écrit donc :



2. a. L'ion permanganate est violet en solution aqueuse. La concentration de ce réactif diminue au cours du temps et donc la coloration de la solution s'atténue.

b. On aurait donc pu également suivre la cinétique de cette réaction par spectrophotométrie.

3. Le dosage a pour objet de déterminer la concentration en ions permanganate à une date donnée. Pour cela, on doit stopper la réaction lente à laquelle ils participent. On dilue donc le milieu réactionnel par de l'eau glacée : la concentration étant un facteur cinétique, tout comme la température, la durée d'évolution du système chimique augmente et on peut considérer qu'il est cinétiquement inerte le temps du dosage.

4. Le temps de demi-réaction est la durée nécessaire pour que le système atteigne la moitié de son avancement final. Sa détermination graphique nécessite au préalable le calcul de l'avancement final de la réaction étudiée.

$$n(\text{MnO}_4^-) = 0,20 \times 50 \times 10^{-3} = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol.}$$

$$n(\text{C}_3\text{H}_8\text{O}) = \frac{m(\text{C}_3\text{H}_8\text{O})}{M(\text{C}_3\text{H}_8\text{O})} = \frac{\rho(\text{C}_3\text{H}_8\text{O}) \cdot V}{M(\text{C}_3\text{H}_8\text{O})} = 1,3 \times 10^{-2} \text{ mol.}$$

En regard de la stœchiométrie de la réaction, le propan-2-ol est le réactif limitant et l'avancement final :

$$x_f = 2,6 \times 10^{-3} \text{ mol (vérifié graphiquement).}$$

On a donc $x(t_{1/2}) = 1,3 \times 10^{-3} \text{ mol}$.

Graphiquement, on peut lire $t_{1/2} = 2,8 \text{ min}$.

5. L'expérience 2 est réalisée à une température inférieure à celle de l'expérience 1. Lorsque la température décroît, la durée d'évolution du système chimique augmente : l'avancement final est donc atteint à une date ultérieure.

L'expérience 3 est réalisée à la même température que l'expérience 1 mais la concentration en ions permanganate est augmentée. Lorsque la concentration en réactif croît, la durée d'évolution du système chimique décroît : l'avancement final de la réaction est atteint plus rapidement.

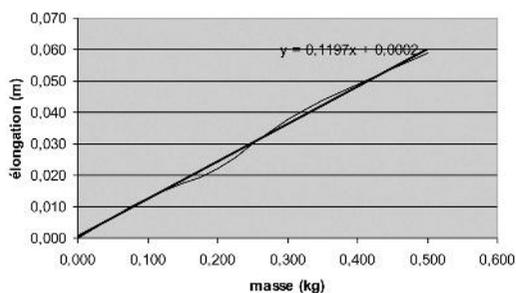
6. L'usage d'un catalyseur de réaction est un facteur cinétique : il conduit à diminuer la durée d'évolution du système chimique mais ne modifie en rien l'état final du système considéré. La courbe **b** ne traduit donc pas l'évolution d'un tel système chimique.

Étude d'oscillateurs

1. a.

	A	B
1	m (kg)	L-L0 (m)
2	0,000	0,000
3	0,100	0,013
4	0,200	0,022
5	0,300	0,038
6	0,400	0,049
7	0,500	0,059

b. Élongation du ressort en fonction de la masse



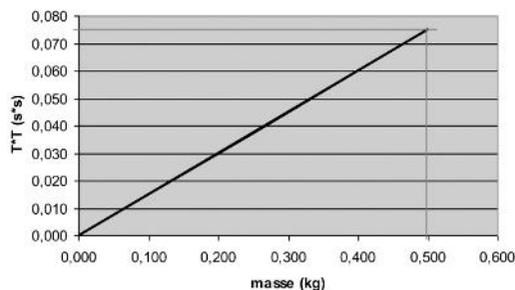
En modélisant la courbe obtenue par une droite, on obtient une courbe de tendance d'équation :

$$\Delta L = 0,120 m \text{ donc } m/\Delta L = 8,33.$$

Comme $F = k \cdot \Delta L$, on a $m \cdot g = k \cdot \Delta L$.

Donc $k = m \cdot g/\Delta L = 9,8 \times 8,33 = 82 \text{ USI}$.

2. $T^2 = f(m)$



3. a. Pour une masse donnée, on mesure la valeur de T en mesurant plusieurs valeurs de T et ceci plusieurs fois.

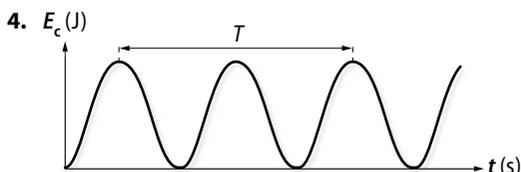
Pour $m = 0,500 \text{ kg}$, on mesure :

10 T (s)	2,7	2,6	2,7	2,8
T (s)	0,27	0,26	0,27	0,28

$T = 0,27 \text{ s}$.

$T^2 = 0,073 \text{ s}^2$.

b. La valeur est reportée sur la courbe.



Conformations des molécules

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
<ul style="list-style-type: none"> – Formule topologique des molécules organiques. – Représentation de Cram. – Conformation : rotation autour d'une liaison simple ; conformation la plus stable. – Propriétés biologiques et stéréoisomérisation. 	<ul style="list-style-type: none"> – Utiliser la représentation topologique des molécules organiques. – Utiliser la représentation de Cram. – Visualiser, à partir d'un modèle moléculaire ou d'un logiciel de simulation, les différentes conformations d'une molécule. – Extraire et exploiter des informations sur les conformations de molécules biologiques pour mettre en évidence l'importance de la stéréoisomérisation dans la nature.

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Utiliser la représentation topologique et la représentation de Cram.
2. Savoir qu'une molécule peut exister sous différentes conformations.
3. Connaître l'importance de la conformation des molécules biologiques.

Évaluation diagnostique p. 256

SITUATION 1

Les élèves ont déjà rencontré la formule semi-développée **a**. La représentation topologique **b**, plus concise et rapide à écrire que **a** et la représentation de Cram **c**, qui donne une information sur la position des atomes dans l'espace, sont présentées dans l'**activité 1**.

SITUATION 2

À partir d'une situation concrète qui relève des « recettes de grand-mère », on fait ici émerger l'idée que la modification de la structure de molécules n'implique pas nécessairement de modifier des liaisons covalentes : on illustre ainsi l'importance de la conformation des molécules biologiques. Ceci est développé dans l'**activité 2**.

SITUATION 3

Cette situation met en évidence le fait qu'une molécule peut exister sous différentes conformations, obtenues par rotation autour d'une liaison simple carbone-carbone. L'**activité 3** permet de mieux appréhender cette notion grâce à l'utilisation des modèles moléculaires.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

Représentations de molécules

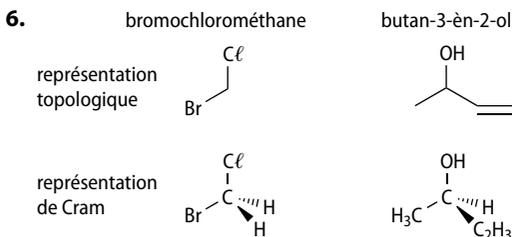
p. 258

1. Dans la représentation topologique :
 - a. les atomes de carbone et les atomes d'hydrogène liés à des atomes de carbone ne sont pas écrits ;
 - b. les liaisons simples carbone-carbone sont représentées par des segments, les liaisons doubles par des segments doubles.
2. La représentation topologique est plus simple et rapide à écrire, mais elle ne renseigne pas sur l'arrangement dans l'espace des atomes, contrairement à la représentation à l'aide de modèles moléculaires.
3. Le triangle plein entre certains atomes peut faire penser à un « coin volant ».
- 4.

Position de la liaison	Dans le plan de la feuille	En avant du plan	En arrière du plan
Dessin	Trait plein	Triangle plein dont la pointe est dirigée vers l'atome situé dans le plan	Triangle hachuré dont la pointe est dirigée vers l'atome situé dans le plan ou trait en pointillés

5. L'intérêt de la représentation de Cram :
 - a. par rapport aux modèles moléculaires est de donner directement le symbole des atomes sans passer par un code de couleur, et surtout de proposer une représentation dans le plan ;

b. par rapport à la représentation topologique est de préciser l'arrangement dans l'espace des différents atomes.



ACTIVITÉ 2

Comment bien cuire un œuf ?

p. 259

1. a. L'aspartate et le glutamate, qui sont des ions, peuvent être responsables d'une répulsion électrostatique forte.

b. Les élèves ont vu en Première S qu'une liaison hydrogène peut s'établir entre un atome d'hydrogène lié à un atome d'oxygène, d'azote ou de fluor et un autre atome d'oxygène, d'azote ou de fluor : tous les acides aminés peuvent donc former des liaisons hydrogène (même si le OH de la fonction carboxyle disparaît lors de la formation de la liaison peptidique).

2. a. Les interactions électrostatiques sont modifiées par l'introduction d'ions dans la solution, mais les interactions de van der Waals et les liaisons hydrogène seront également affaiblies.

b. Le sucre étant composé de molécules, il ne perturbe pas les interactions électrostatiques et aura donc un effet moindre ou nul.

3. Les élèves ont vu en Troisième qu'une solution acide contient des ions H^+ : ces ions vont perturber les interactions électrostatiques et conduire à la dénaturation des protéines.

4. a. Les liaisons covalentes ne sont pas forcément modifiées lors de la cuisson de l'œuf (si on chauffe trop, cela peut néanmoins arriver).

b. Lors de la cuisson de l'œuf, les protéines subissent un changement de structure, de disposition dans l'espace des atomes : elles changent de conformation.

ACTIVITÉ 3

Conformations et énergie

p. 260

1. Les différentes conformations seront *a priori* différentes : cela permet de montrer qu'à une molécule peuvent correspondre différentes conformations.

2. On peut obtenir une infinité de conformations.

3. Les conformations éclipsées sont obtenues pour $\alpha = 0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ et 360° . Les conformations décalées correspondent à $\alpha = 60^\circ, 180^\circ$ et 300° .



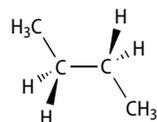
5. Les conformations les moins stables sont celles qui ont l'énergie la plus haute, donc celles qui correspondent à $\alpha = 0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ et 360° . D'après la question 3, elles correspondent donc aux conformations éclipsées.

6. a. Les modèles moléculaires montrent une « gêne stérique » entre les groupements lorsque les atomes de chlore « s'éclipsent ».

b. La courbe montre que la conformation d'énergie maximale est obtenue pour $\alpha = 0^\circ$: cela confirme que la conformation la moins stable est celle pour laquelle les atomes de chlore sont en position éclipsée.

7. La conformation la plus stable est obtenue pour $\alpha = 180^\circ$: c'est pour cette valeur que les atomes de chlore se gênent le moins. Cette conformation est appelée conformation anti.

8. La conformation la plus stable du butane est celle pour laquelle les groupements méthyle portés par les atomes C_2 et C_3 sont en position anti. La représentation de Cram correspondante est :



EXERCICES

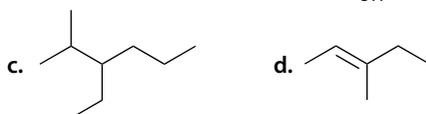
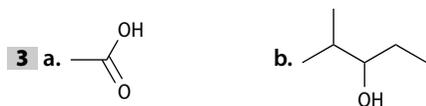
COMPÉTENCE 1 : Utiliser la représentation topologique et la représentation de Cram

1. **Faux.** Seuls les atomes d'hydrogène liés à des atomes de carbone ne sont pas représentés.

2. **Vrai.**

3. **Vrai.**

4. **Vrai.**



2. a. $M(C_3H_8O) = 60 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$;

b. $M(C_4H_{11}N) = 73 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$;

c. $M(C_5H_{11}O_2SN) = 149 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

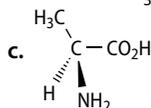
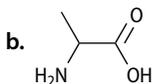
4. 1. H_2, H_3 et H_7 sont situés à l'avant du plan.

2. H₄ et H₆ sont situés à l'arrière du plan.

5 1. La représentation **b** ne convient pas car les angles des liaisons établies par le carbone central ne valent pas 109° mais plutôt 90°.

2. La molécule représentée est le propan-2-ol.

6 a. La formule brute de l'alanine est C₃H₇NO₂.



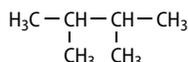
COMPÉTENCE 2 : Savoir qu'une molécule peut exister sous différentes conformations

7 1. b et c.

2. b et d.

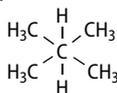
8 Seuls le méthanol et l'éthène ne peuvent exister sous différentes conformations puisqu'ils n'ont pas de liaison C-C autour de laquelle on peut faire pivoter les différents groupements.

10 1. La formule semi-développée du 2,3-diméthylbutane est :



2. a. Le carbone C₂ porte un atome d'hydrogène et deux groupes méthyle. Il en est de même pour le carbone C₃.

b. La conformation la plus stable est celle pour laquelle les substituants les plus volumineux sont le plus éloignés possibles, d'où :



11 Extrait du discours de remise du Prix Nobel de Derek Barton

Derek Barton fut co-lauréat du Prix Nobel de Chimie en 1969 pour sa « contribution au développement du concept de conformation et son application en chimie ». Voici un extrait du discours qu'il fit à la cérémonie de remise du Prix. « Dans la décade qui débute en 1930, il est devenu évident qu'il existe une barrière à la "rotation libre" autour des deux groupes méthyle dans l'éthane. (...) En fait, le terme "conformation" avait déjà été utilisé dans la chimie des sucres par W. N. Haworth. (...) Ainsi, toute molécule a théoriquement un nombre infini de conformations. Par bonheur, la complexité née de cette définition est réduite par le fait que, en général, seules quelques conformations sont énergétiquement favorisées (...) »

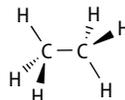
1. D'après le texte, est-il correct de parler de « rotation libre » autour d'une liaison simple carbone-carbone ?

D'après le texte, il existe une barrière à la rotation autour de la liaison C-C dans le cas de l'éthane. On peut généraliser ce résultat aux autres molécules.

2. À température ambiante, sous combien de conformations différentes peut-on rencontrer la molécule d'éthane ? À température ambiante, la molécule d'éthane existe sous une infinité de conformations différentes.

3. Dans le cas de l'éthane, quelle est la conformation énergétiquement favorisée ?

La conformation énergétiquement favorisée de l'éthane est celle pour laquelle les atomes d'hydrogène sont le plus éloignés possible, soit :



COMPÉTENCE 3 : Extraire et exploiter des informations sur la conformation des molécules biologiques

12 1. a et b.

2. b.

13 1. La représentation **c** correspond à une rotation de l'hélice vers la gauche : c'est l'ADN Z.

La représentation **a** a un diamètre d'environ 0,9 cm et celle de **b** d'environ 1 cm : **b** correspond donc à l'ADN A et **a** à l'ADN B. On peut remarquer que le pas de l'hélice sur la représentation **a** est le même que pour la représentation **b** : ces schémas ne sont qu'une représentation très simplifiée des différentes conformations.

2. Le passage de l'ADN A à l'ADN B correspond à un changement de conformation : il ne nécessite donc pas la rupture de liaisons covalentes.

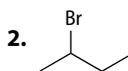
14 1. a. De façon générale, la vitesse des réactions augmente quand la température augmente.

b. En considérant que quand l'enzyme est dénaturée la vitesse de la réaction est nulle, on en déduit une estimation de la température de dénaturation à 48 °C.

2. D'après le texte, « l'activation du pepsinogène en pepsine est obtenue par action de l'acide chlorhydrique », donc cette enzyme est active en milieu acide, c'est-à-dire à pH faible : la courbe correspondant à la pepsine est la courbe bleue.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

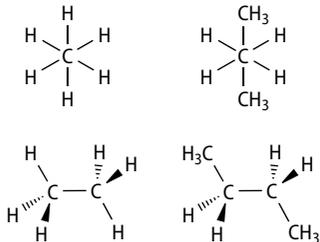
15 1. Il s'agit de la représentation de Cram.



3. La représentation topologique ne renseigne pas sur l'arrangement dans l'espace des atomes, contrairement à la représentation de Cram.

16 1. Les molécules sont l'éthane et le butane.

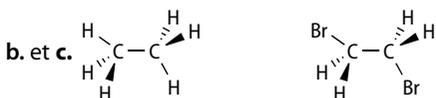
2. Les conformations proposées ne correspondent pas aux conformations les plus stables qui sont :



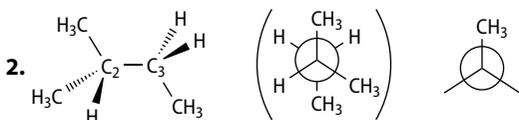
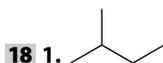
3. C'est la conformation du butane qui correspond à l'énergie la plus grande car deux groupes méthyle éclipsés déstabilisent davantage la molécule que deux atomes d'hydrogène éclipsés.

17 1. C'est la première courbe qui correspond à l'éthane.

2. a. La conformation la plus stable est obtenue pour $\alpha = 60^\circ$ (et 180° et 300°) pour l'éthane, pour $\alpha = 180^\circ$ pour le 1,2-dibromoéthane.



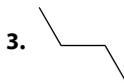
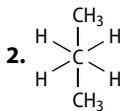
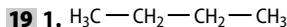
3. L'énergie maximale est plus grande pour le 1,2-dibromoéthane que pour l'éthane car deux atomes de brome éclipsés déstabilisent davantage la conformation que deux atomes d'hydrogène.



3. L'énergie de la conformation la plus stable étant supérieure à zéro sur la courbe proposée, on en déduit que la référence des énergies nulles n'a pas été prise pour cette conformation.

4. Les angles 60° et 180° correspondent aux conformations les plus stables d'après la courbe.

5. La conformation proposée pour le butane n'est pas la plus stable car les groupes méthyle « éclipsent » des atomes d'hydrogène et ne sont donc pas le plus éloignés possible des autres groupes ou atomes.



4. En généralisant le résultat précédent, on déduit que la meilleure représentation est la représentation a.

20 1. $n_s/n_i = \exp[-(E_s - E_i)/(RT)]$

avec $E_s - E_i = -11,2 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$. Donc :

$n_s/n_i = \exp[11,2 \times 10^3 / (8,31 \times (25,0 + 273))]$, soit 92,1.

2. La quantité de matière d'éthane dans l'échantillon est donnée par $n = m/M$, donc 1,00 mol, soit :

$6,02 \times 10^{23}$ molécules.

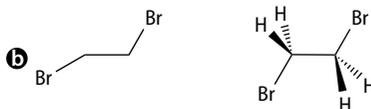
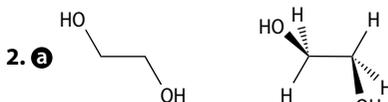
On résout le système : $n_s + n_i = 6,02 \times 10^{23}$ et $n_s/n_i = 92,1$.

On trouve $n_s = 5,96 \times 10^{23}$ molécules et :

$n_i = 6,47 \times 10^{21}$ molécules.

3. Quand T augmente, l'exposant de e diminue donc n_s/n_i diminue : de plus en plus de molécules peuvent atteindre l'énergie supérieure de la conformation la moins stable. Cela est cohérent avec le fait que l'énergie moyenne des molécules d'un échantillon augmente quand la température augmente.

21 1. Une liaison hydrogène peut s'établir entre un atome d'hydrogène porté par un atome d'oxygène, d'azote ou de fluor et un autre atome d'oxygène, d'azote ou de fluor.



3. Pour le composé bromé, les atomes de brome sont le plus éloignés possible, ce qui était prévisible pour la conformation la plus stable. Pour les groupes hydroxyle, on constate que les OH ne sont pas le plus éloignés possible : cela peut s'interpréter par le fait que cette position permet l'établissement de liaisons hydrogène, qui stabilisent cette conformation.

22 1. Les éléments du texte qui confirment que les enzymes sont des catalyseurs sont : « La vitesse de certaines réactions est plus grande en présence d'enzymes » et « l'enzyme se retrouve inchangée et peut ainsi accélérer la réaction d'un nouveau substrat ».

2. Le modèle clef-serrure est dû au chimiste allemand Emil Fischer. Son principal inconvénient est de « laisser croire à la rigidité totale des molécules et du site actif ».

3. Réponse **b**.

4. Parce que les différences d'énergie sont faibles, l'utilisation d'enzymes permet de faire les réactions dans des conditions « plus douces ».

5. **a.** D'après le texte, on dit qu'une enzyme est dénaturée quand elle a perdu la conformation qui lui confère son activité.

b. Le pH et la température sont deux paramètres dont la variation peut entraîner une dénaturation des protéines que sont les enzymes.

EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

23 1. D'après la représentation topologique proposée, la formule brute du menthol est $C_{10}H_{20}O$ donc sa masse molaire vaut $156 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$. Or, 5,0 mL de menthol pur correspondent à une masse $m = 4,5 \text{ g}$ d'où :

$$n = m/M = 2,9 \times 10^{-2} \text{ mol.}$$

2. La représentation topologique du cyclohexane est :



3. **a.** Les angles internes d'un hexagone valent tous 120° , donc les angles \widehat{CCC} valent 120° .

b. Cet angle doit alors valoir 109° .

c. Dans le cyclohexane, les atomes de carbone forment 4 liaisons, donc \widehat{CCC} doit tendre vers 109° , ce qui est incompatible avec une structure plane d'après la question **3.a**.

4. D'après le schéma, l'angle \widehat{CCC} est voisin de $100-110^\circ$, donc proche des 109° .

5. Chaise 1 et chaise 2 correspondent à des arrangements différents d'atomes d'une même molécule obtenus sans rupture de liaisons : ce sont deux conformations différentes.

6. D'après le texte, « à la température ambiante, le passage d'une forme à l'autre s'effectue environ 10^5 fois par seconde », donc on ne peut pas isoler l'une des formes.

7. Quand la température diminue, l'énergie moyenne des molécules diminue : le nombre d'interconversions doit diminuer.

Chiralité

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
<ul style="list-style-type: none"> - Chiralité : définition, approche historique. - Carbone asymétrique. - Chiralité des acides α-aminés. - Énantiomérie, mélange racémique, diastéréoisomérisation (<i>Z/E</i>, deux atomes de carbone asymétriques). - Propriétés biologiques et stéréoisomérisation. 	<ul style="list-style-type: none"> - Reconnaître des espèces chirales à partir de leur représentation. - Identifier les atomes de carbone asymétriques d'une molécule donnée. - À partir d'un modèle moléculaire ou d'une représentation, reconnaître si des molécules sont identiques, énantiomères ou diastéréoisomères. - Pratiquer une démarche expérimentale pour mettre en évidence des propriétés différentes de diastéréoisomères. - Extraire et exploiter des informations sur les propriétés biologiques de stéréoisomères.

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Reconnaître des espèces chirales et des atomes de carbone asymétriques.
2. Reconnaître si des molécules sont identiques, énantiomères ou diastéréoisomères.
3. Extraire et exploiter des informations sur les propriétés des stéréoisomères.

Évaluation diagnostique

p. 272

SITUATION 1

Le but est de faire émerger la notion de chiralité dans l'esprit des élèves. Une discussion peut s'engager sur la différence essentielle entre les deux objets présentés : la vis n'est pas superposable à son image dans un miroir (objet chiral), le clou l'est (objet achiral).

L'activité 1 illustre l'émergence de la chiralité (et son lien avec le pouvoir rotatoire) dans l'histoire de la chimie.

SITUATION 2

Les élèves doivent ici considérer avec attention les deux molécules pour constater que l'arrangement des substituants autour du carbone asymétrique est différent. Les deux représentations ne peuvent être mises en concordance même en changeant de conformation. L'activité 3 permet d'introduire la notion d'énantiomères (par opposition à diastéréoisomères).

Pour ceux qui penseraient que si peu de différence entre deux molécules ne peut avoir de grandes conséquences, l'activité 2 fournit un contre-exemple tragique.

SITUATION 3

La molécule proposée présente l'isomérisation *Z/E*, rencontrée en classe de Première S : c'est l'occasion de revoir cette notion avec les élèves. L'activité 4 montre que des diastéréoisomères *Z/E* ont des propriétés différentes.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1**Le mystère de l'acide racémique**

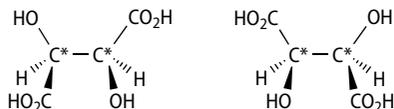
p. 274

1. D'après le texte, l'essence de térébenthine fait tourner le plan de polarisation de la lumière polarisée : c'est pourquoi elle est qualifiée d'optiquement active.

2. Une main est l'objet type d'un objet non superposable à son image dans un miroir.

3. L'acide racémique est constitué de cristaux dont certains dévient la direction de la lumière polarisée vers la droite et d'autres vers la gauche : ces effets se compensent et au total la déviation est nulle.

4. a. et b. La représentation de Cram donnée ci-après à gauche correspond à la représentation de l'acide tartrique proposée dans l'activité. Son image dans un miroir est représentée à droite.



c. Les atomes de carbone asymétriques sont repérés sur les molécules ci-dessus par un astérisque.

5. a. Un ressort et un pied sont des exemples de composés chiraux.

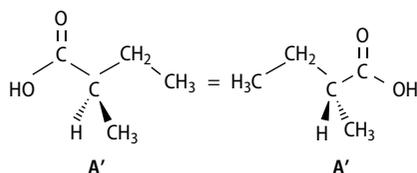
b. On peut citer le bromochlorofluorométhane ou le bromochlorométhanol (un seul atome de carbone asymétrique).

ACTIVITÉ 2

Séparer des énantiomères

p. 275

1. a. Deux représentations de **A'**, image de **A** dans un miroir, sont données ci-dessous.



b. La représentation de **A'** donnée ci-dessus à droite correspond à celle de **B** : **A' = B**. Donc **A** et **B** sont images l'une de l'autre dans un miroir et non superposables : elles sont énantiomères.

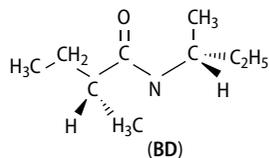
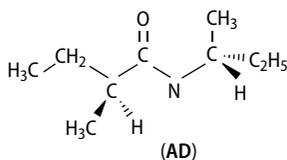
c. La distillation met en jeu un phénomène physique non chiral : d'après le « Pour commencer », deux énantiomères tels que **A** et **B** ne peuvent donc pas être séparés par distillation.

2. Les molécules de la figure 1 comportent un groupe acide carboxylique, celles de la figure 2 comportent un groupe amine donc, d'après le « Pour commencer », ces molécules peuvent réagir pour donner de l'eau et un amide.

3. a. En comparant (**AC**) et (**BC**), on voit qu'elles ne sont pas identiques : l'arrangement des atomes autour du C* est différent dans ces deux molécules. Mais si l'on fait pivoter (**BC**) par rapport au plan de la feuille, on retrouve (**AC**) donc (**AC**) et (**BC**) sont images non superposables dans un miroir : elles sont énantiomères.

b. Ces produits ne sont donc pas séparables par distillation.

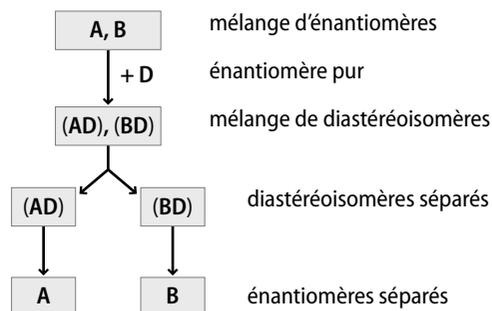
4. a. Pour passer de (**AC**) à (**AD**), on remplace un CH₃ sur le carbone adjacent au groupe amine par un C₂H₅ ; de même pour passer de (**BC**) à (**BD**), d'où :



b. (**AD**) et (**BD**) ont le même enchaînement d'atomes mais ne sont ni superposables ni images l'un de l'autre dans un miroir : ce sont des diastéréoisomères.

c. (**AD**) et (**BD**) sont deux diastéréoisomères, dont les propriétés physiques sont en général différentes : ils pourront donc être séparés par distillation.

5. On peut proposer le schéma suivant (voir aussi l'exercice 28) :



6. Il faut :

- que le réactif mis en jeu soit chiral et présent sous forme d'un énantiomère pur ;
- que la réaction mise en jeu soit réversible (on doit pouvoir repasser des diastéréoisomères aux énantiomères).

ACTIVITÉ 3

Énantiomérisation dans le vivant

p. 276

1. Un effet tératogène est un effet néfaste pour le fœtus ou l'embryon.

2. Entre 1957 et 1961, il s'est écoulé quatre ans... Cela peut s'expliquer par la difficulté à faire le lien entre la maladie et le traitement (certains mettaient en cause les essais nucléaires, la télévision, etc.), d'autant plus que des intérêts économiques étaient en jeu.

3. Les récepteurs biologiques sont eux-mêmes chiraux.

4. La molécule **a** présente un C* et un seul : elle est chirale, contrairement à la molécule **b** (qui est le bromazépan, commercialisé sous le nom de Lexomil®). Le thalidomide correspond donc à la représentation **a** sur la figure 1.

5. a. La séparation de deux énantiomères est difficile puisqu'ils ont les mêmes températures de changement d'état, la même solubilité, etc.

b. Cette séparation n'était pas réalisée par Chemie Gruenthal.

6. La tragédie du thalidomide a mis en évidence les différences énormes, du point de vue biologique, qui peuvent exister entre deux énantiomères, molécules pourtant si ressemblantes.

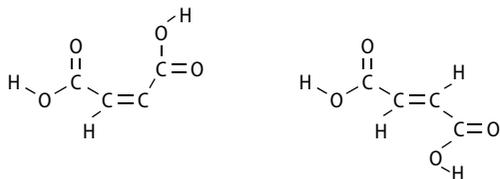
ACTIVITÉ 4

Comparer des stéréoisomères

p. 277

Les produits A et B sont l'acide maléique (acide (Z)-butènedioïque) et l'acide fumarique (acide (E)-butènedioïque).

1. Les deux formules possibles sont :



2. Les liaisons hydrogène qui peuvent s'établir entre les groupes carboxyles sont intramoléculaires dans la molécule de gauche, intermoléculaires dans celle de droite. La cohésion entre molécules est donc plus importante pour les molécules de droite : la température de fusion du solide qu'elles composent est donc supérieure à celle du solide formé par les molécules représentées à gauche.

La température de fusion de l'acide maléique vaut 130 °C, celle de l'acide fumarique est supérieure à 287 °C (valeur obtenue en tube scellé) : on ne peut pas la déterminer avec le banc Kofler, mais l'expérience montre bien les différences entre les températures de fusion des deux composés.

3. Le composé le plus soluble est l'acide maléique.

4. On détermine un volume équivalent de l'ordre de 16 mL. On calcule $n = 0,10 \times 16,0 \times 10^{-3} / 2 = 8,5 \times 10^{-4}$ mol : c'est la quantité maximale de composé soluble dans 20,0 mL d'eau, soit $4,3 \times 10^{-2}$ mol · L⁻¹. Comme la masse molaire vaut 116 g · mol⁻¹, on trouve une solubilité de 4,9 g · L⁻¹ (la solubilité à 25 °C vaut 7,0 g · L⁻¹).

5. On ne peut pas utiliser le même protocole car le volume de soude à verser serait beaucoup trop grand. On pourrait adapter ce protocole en diluant la solution saturée avant de la doser, mais la précision serait alors moins bonne.

6. Il faut préparer deux solutions de mêmes concentrations en A et B : les élèves doivent prendre conscience qu'ils sont limités par la solubilité de l'espèce la moins soluble, soit environ $4,3 \times 10^{-2}$ mol · L⁻¹.

Exemple de protocole : peser une masse $m = 0,20$ g d'un des deux composés dans une capsule de pesée et utiliser la fiole jaugée de 200 mL pour préparer la solution voulue : on obtient ainsi une solution à $8,6 \times 10^{-3}$ mol · L⁻¹.

Transvaser cette solution dans un bécher, et procéder de même pour préparer la solution du deuxième composé. Utiliser alors le papier pH pour évaluer la valeur du pH de chacune des solutions.

7. Les deux solutions sont nettement acides, mais le papier pH montre que la solution d'acide maléique (le plus soluble) est légèrement plus acide que la solution d'acide fumarique (le moins acide).

8. Ces deux molécules sont diastéréoisomères : même formule semi-développée (HOOC-CH=CH-COOH) mais elles ne sont ni images l'une de l'autre dans un miroir ni identiques.

9. Le TP montre que des diastéréoisomères ont des propriétés physiques (température de fusion et solubilité) et chimiques (acidité) différentes.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : Reconnaître des espèces chirales et des atomes de carbone asymétriques

1. *Vrai.*

2. *Faux.*

3. *Vrai.*

4. *Vrai.* Il n'y a qu'un seul atome de carbone asymétrique.

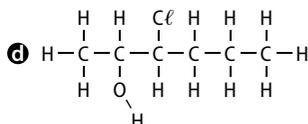
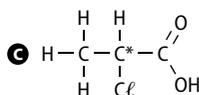
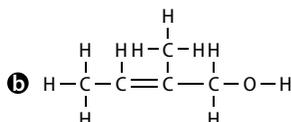
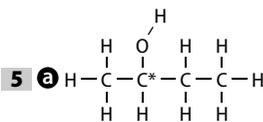
5. *Faux.* Il faudrait préciser qu'il n'y a qu'un seul atome de carbone asymétrique.

6. *Faux.* La définition de la chiralité n'est pas liée uniquement à la présence d'un atome de carbone asymétrique.

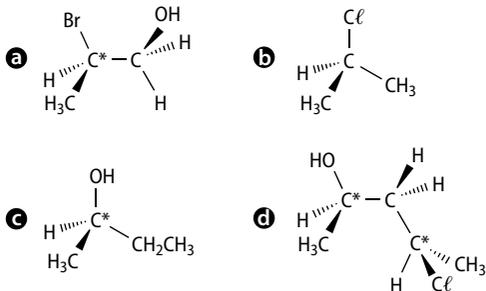
2. 1. Un objet est chiral s'il n'est pas superposable à son image dans un miroir.

2. Un atome de carbone est asymétrique s'il est lié à quatre atomes ou groupes différents les uns des autres.

3. Objets chiraux : **a.** un escalier en colimaçon, **d.** un tire-bouchon, **e.** un escargot, **f.** une chaussure.



6 1. Les atomes de carbone asymétriques sont repérés par un astérisque sur les schémas ci-dessous.



2. Les molécules chirales sont **a**, **c** (un seul C*) et **d** (on peut vérifier qu'elle n'est pas superposable à son image dans un miroir).

7 Les molécules **d**. ($\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{C}^*\text{HOH}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3$) et **e**. ($\text{H}_2(\text{HO})\text{C}-\text{C}^*\text{H}(\text{CH}_3)-\text{CH}_2-\text{CH}_3$) sont chirales car elles comportent un seul C* ; pour **a**. et **b**., on peut vérifier qu'elles ne sont pas superposables à leur image dans un miroir : elles sont donc aussi chirales.

COMPÉTENCE 2 : Reconnaître si des molécules sont identiques, énantiomères ou diastéréoisomères

8 1. Faux. Une même molécule existe sous différentes conformations.

2. Vrai.

3. Faux. Penser aux diastéréoisomères de l'acide tartrique (Fig. 5 p. 279).

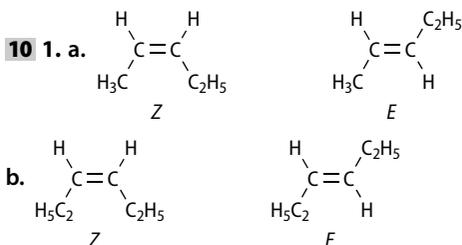
4. Vrai.

5. Faux. Il existe des diastéréoisomères non chiraux.

9 1. Deux molécules sont énantiomères si elles sont images l'une de l'autre dans un miroir mais non superposables.

2. Un mélange racémique est un mélange équimolaire de deux énantiomères.

3. Deux molécules sont diastéréoisomères si elles ont le même enchaînement d'atomes mais ne sont ni images l'une de l'autre dans un miroir, ni superposables même après rotation autour de liaisons simples.



2. Les molécules écrites en **1.a** sont diastéréoisomères car elles ont le même enchaînement d'atomes mais ne sont ni images l'une de l'autre dans un miroir ni superposables. De même pour les molécules écrites en **1.b**.

12 a Couple d'énantiomères.

b Couple de diastéréoisomères.

c Couple de diastéréoisomères (E et Z).

13 a Couple d'énantiomères (images l'un de l'autre dans un miroir).

b Molécules identiques.

c Couple d'énantiomères.

d Molécules identiques.

COMPÉTENCE 3 : Extraire et exploiter des informations sur les propriétés des stéréoisomères

14 1. Faux. Les propriétés biologiques peuvent être différentes.

2. Vrai.

3. Faux.

15 1. Les propriétés qui peuvent être différentes pour deux énantiomères sont : **d**. odeur et **f**. activité thérapeutique.

2. Parmi les propriétés citées, seule la masse molaire **b**. est forcément identique pour deux diastéréoisomères.

16 1. D'après la représentation topologique du géraniol, sa formule brute est $\text{C}_{10}\text{H}_{18}\text{O}$ donc sa masse molaire vaut $154 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

2. D'après leur représentation topologique, géraniol et néraniol sont diastéréoisomères : ces composés ont donc la même masse molaire, ce qui permet de compléter seulement une ligne du tableau.

17 1. Le texte mentionne les acides α -aminés et les sucres.

2. On peut citer le thalidomide.

3. **a.** Le métabolisme désigne « l'ensemble des réactions chimiques de transformation de matière et d'énergie, catalysées par des enzymes, qui s'accomplissent dans tous les tissus de l'organisme vivant » (*Petit Larousse*, 2003).

b. D'après le texte, deux énantiomères peuvent avoir des activités différentes, des conversions métaboliques différentes (et donc être dégradés en sous-produits différents, dont certains peuvent être toxiques et d'autres pas) et une cinétique pharmaceutique différentes (donc une vitesse d'assimilation variable par exemple).

4. **a.** Sur un navire, le ballast désigne le compartiment servant au lestage et à l'équilibrage du navire.

b. Le ballast isomérique désigne le fait que l'énantiomère, dont les propriétés thérapeutiques sont recherchées, est mélangé, dans le médicament, à son énantiomère : cela crée une « surcharge », comme l'eau introduite dans le ballast des navires.

18 1. On reconnaît la présence d'un atome de carbone lié d'une part à un groupe amine, d'autre part à un groupe carboxyle : la molécule représentée est bien un acide α -aminé.

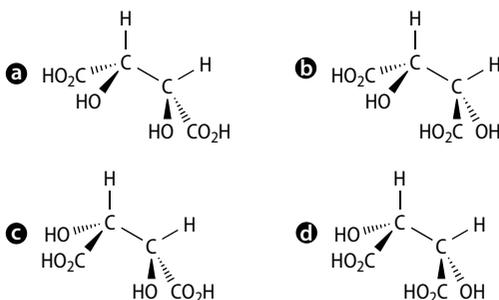
2. D'après le raisonnement de Pasteur, les récepteurs biologiques mis en jeu dans la perception du goût de l'asparagine doivent être « dissymétriques », c'est-à-dire chiraux.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

19 1. Le vaccin contre la rage est sans doute l'apport le plus connu de Pasteur.

2. Il y a deux atomes de carbone asymétriques :
 $\text{HOOC}-\text{C}^*-\text{HOH}-\text{C}^*-\text{HOH}-\text{COOH}$.

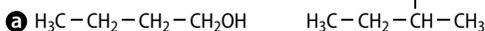
3. On peut proposer les représentations suivantes, mais **a** et **d** sont en fait identiques.



4. Seules les molécules **b** et **c** sont chirales.

5. Les molécules représentées en **a** et **d** sont identiques. (**b** ; **c**) est un couple d'énantiomères, (**a** ; **b**) et (**a** ; **c**) sont des couples de diastéréoisomères.

20 1.



2. Température d'ébullition : $^\circ\text{C}$; masse volumique : $\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$; indice de réfraction : sans unité.

3. a. Les propriétés apparaissant dans le tableau étant identiques pour les deux composés, on en déduit qu'ils sont énantiomères.

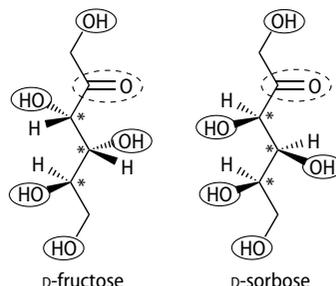
b. Parmi les molécules écrites en 1, seule la molécule **b** est chirale et existe donc sous forme de deux énantiomères : il s'agit du butan-2-ol.

21 1. Sur les trois acides α -aminés, on reconnaît le groupe carboxyle et le groupe amine.

2. Un atome de carbone est asymétrique s'il est lié à quatre atomes ou groupes différents les uns des autres. La glycine ne contient pas de C^* , l'alanine et la lysine en contiennent chacune un.

3. Deux molécules images dans un miroir sont des énantiomères. Un mélange équimolaire de deux énantiomères est un mélange racémique.

22 1. On reconnaît les groupes alcool (entouré en trait plein) et cétone (entouré en pointillés).



2. Chacune de ces molécules contient trois atomes de carbone asymétriques.

3. Ces deux molécules présentent seulement deux différences : l'arrangement dans l'espace des atomes et groupes d'atomes portés par les deux atomes de carbone asymétriques les plus proches du groupe carboxyle est différent.

4. Ces molécules ont des enchaînements d'atomes identiques mais ne sont ni images dans un miroir, ni superposables : elles sont diastéréoisomères. Les propriétés physiques et chimiques de deux diastéréoisomères étant en général différentes, il n'est pas étonnant que les abeilles puissent distinguer le D-fructose et le D-sorbose.

23 1. C'est un mélange racémique.

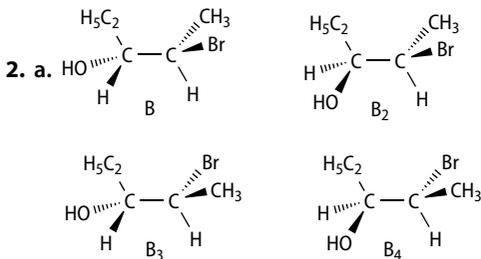
2. Il est parfois nécessaire de séparer les deux énantiomères car ils peuvent agir différemment si le phénomène physique ou le réactif mis en jeu est lui-même chiral.

3. Il est impossible de séparer directement A et A* car deux énantiomères ont des propriétés physiques (telles que température d'ébullition, solubilité, etc.) identiques.

4. AB* et A*B* étant des diastéréoisomères, ces nouvelles espèces peuvent être directement séparées car elles ont en général des propriétés physiques et chimiques différentes.

5. L'espèce B* doit : 1. être chirale, 2. être utilisée sous la forme d'un seul énantiomère, 3. réagir avec A et A* selon une réaction réversible.

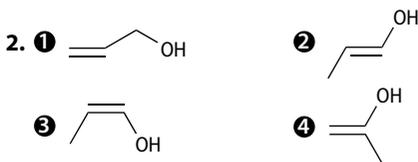
24 1. a. Les molécules **a** et **b** sont chirales car elles ne sont pas superposables à leur image dans un miroir. **b.** Les molécules **b** et **c** comportent deux atomes de carbone asymétriques.



(B, B₄) et (B₂, B₃) sont des couples d'énantiomères. Les autres combinaisons sont des couples de diastéréoisomères.

b. Seule B₄ a la même température d'ébullition que B puisque les autres sont des diastéréoisomères de B.

25 1. La masse de carbone contenue dans une mole de ce composé vaut $62 \times 58/100 = 36$ g, ce qui correspond à $36/12 = 3$ moles de carbone. La masse d'oxygène vaut $28 \times 58/100 = 16$ g, soit une mole d'oxygène. L'autre élément présent, l'hydrogène, correspond donc à $58 - 36 - 16 = 6$ g soit 6 moles d'hydrogène, d'où la formule brute C₃H₆O.



3. Parmi les molécules représentées ci-dessus, il n'y a pas d'énantiomères. **2** et **3** sont diastéréoisomères.

26 1. La formule brute des oses C_n(H₂O)_n met en évidence n molécules d'eau pour n atomes de carbone, d'où le nom « hydrate de carbone ».

2. La formule brute du glucose est C₆H₁₂O₆ soit C₆(H₂O)₆ ce qui montre qu'il appartient à la famille des oses.

3. Il y a quatre atomes de carbone asymétriques dans la molécule de D-glucose : C₂, C₃, C₄ et C₅ (en numérotant à partir du carbone de la fonction aldéhyde).

4. Les molécules de D-glucose et de L-glucose sont images l'une de l'autre dans un miroir : elles sont énantiomères.

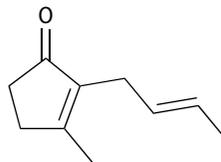
5. On ne peut rien déduire du goût du D-glucose pour le goût du L-glucose car les récepteurs du goût sont eux-mêmes chiraux et peuvent distinguer deux énantiomères.

27 1. La formule brute de la jasmone est C₁₁H₁₆O.

2. On reconnaît le groupe carbonyle (fonction cétone).

3. La double liaison située à l'extérieur du cycle correspond à une stéréochimie Z puisque les atomes d'hydrogène portés par chacun des carbones mis en jeu sont situés du même côté de la double liaison.

4. a. La représentation topologique du diastéréoisomère s'obtient en passant de la forme Z à la forme E.



b. *A priori*, la jasmone de synthèse n'aura pas exactement la même odeur que la jasmone naturelle puisqu'elle contient en plus un diastéréoisomère, et deux diastéréoisomères peuvent avoir des odeurs différentes.

5. Un flacon de 2,0 mL de cette huile essentielle contient $0,88 \times 2,0 = 1,8$ g d'huile essentielle, donc :

$$2 \times 1,88/100 = 4 \times 10^{-2} \text{ g de jasmone,}$$

ce qui correspond à 4×10^{-2} mL.

28 Synthèse asymétrique

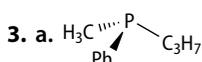
Dans l'étude de toutes les sciences de la vie, les composés chiraux sont importants. Dans le passé, quand on avait besoin de composés chiraux, les chimistes devaient utiliser des procédés biochimiques ou faire des mélanges racémiques puis de laborieuses [séparations appelées] résolutions. Dans l'industrie, le problème est particulièrement grave puisque la résolution, avec ses nombreuses boucles de recyclage et de cristallisations fractionnées, est un procédé intrinsèquement coûteux. [...] Le phosphore, comme le carbone, est tétraédrique, et quand il est lié à quatre constituants différents, il peut exister sous des formes [énantiomériques différentes]. Dans le cas des phosphines, la paire d'électrons célibataires compte comme un substituant. [...] Cette expérience a été réalisée sur l'acide α-phénylacrylique [A] en utilisant le réactif chiral méthylpropylphénylphosphine, conduisant à un excès énantiomérique [de B] de 15 %. [...]

William S. Knowles, extrait de la Conférence du Prix Nobel du 8 décembre 2001.

1. Il est important dans l'industrie d'éviter la formation d'un mélange racémique car séparer les énantiomères est ensuite long et coûteux.

Dans le cadre des synthèses dans les laboratoires de recherche, on travaille sur de plus petites quantités : le temps et le coût requis pour les synthèses sont moins rédhibitoires que dans l'industrie.

2. Il s'agit de catalyseurs.



b. Non, car dans $P(CH_3)_2H$ le phosphore porte deux substituants identiques (deux méthyles), donc ce composé n'est pas chiral.

4. La molécule A n'est pas chirale car elle est identique à son image dans un miroir.

5. La molécule B est chirale puisqu'elle comporte un seul atome de carbone asymétrique.

6. La synthèse présentée permet de favoriser la formation d'un énantiomère par rapport à l'autre avec un processus purement chimique (et non biochimique). Cependant, l'excès énantiomérique est loin des 100 %.

29 1. L'éthanol étant une molécule achirale, l'angle de déviation est nul.

2. L'unité du pouvoir rotatoire spécifique est $\text{degré} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^2$.

3. Les substances chirales sont parfois appelées « substances optiquement actives » car elles ont une « activité » sur la lumière polarisée.

4. Lorsqu'un faisceau de lumière polarisée traverse une solution contenant un mélange racémique, le plan de polarisation n'est pas dévié car l'un des énantiomères dévie la lumière vers la droite, l'autre vers la gauche, et comme un mélange racémique contient autant d'une forme énantiomère que de l'autre, ces déviations se compensent exactement.

5. a. Calculons la valeur de la concentration massique, C , en $\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$.

$M(C_6H_{12}O_6) = 180 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, donc :

$$m = n \cdot M = 4,5 \times 10^{-2} \times 180 = 8,1 \text{ g.}$$

Donc $C = 8,1/200 = 4,1 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$.

Alors $[\alpha] = \alpha/(\ell \cdot C) = 4,2/(20,0 \times 4,1 \times 10^{-2}) = 5,2 \text{ }^\circ \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^2$.

b. La concentration massique serait :

$$C' = \alpha/([\alpha] \cdot \ell) = 6,3/(5,2 \times 20,0) = 6,1 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}.$$

6. a. Le signe moins du pouvoir rotatoire spécifique du fructose signifie qu'il dévie le plan de polarisation de la lumière dans le sens opposé à la déviation due au glucose.

b. La concentration massique en fructose de la solution obtenue est :

$$C' = 10/200 = 5,0 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1} = 5,0 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1},$$

ce qui tend à faire dévier le plan de polarisation de la lumière d'un angle :

$$\alpha' = [\alpha_{\text{fructose}}] \cdot \ell \cdot C' = -90^\circ \times 2,0 \times 5,0 \times 10^{-2} = -9,0^\circ.$$

L'énoncé dit que les pouvoirs rotatoires s'additionnent pour une solution donnée, donc les angles de déviation aussi : le plan de polarisation de la lumière sera dévié de $4,2^\circ - 9,0^\circ$ soit $-4,8^\circ$.

Les réactions en chimie organique

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
Aspect macroscopique : – modification de chaîne, modification de groupe caractéristique ; – grandes catégories de réactions en chimie organique : substitution, addition, élimination.	– Distinguer une modification de chaîne d'une modification de groupe caractéristique. – Déterminer la catégorie d'une réaction (substitution, addition, élimination) à partir de l'examen de la nature des réactifs et des produits.

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Reconnaître une modification de chaîne.
2. Reconnaître une modification de groupe caractéristique.
3. Connaître les grandes catégories de réactions en chimie organique (substitution, addition, élimination).

Évaluation diagnostique

p. 290

SITUATION 1

D'un enjeu économique majeur, le pétrole est ici un bon exemple introductif à la séquence. Après séparation par distillation, les alcanes du pétrole sont transformés en hydrocarbures utiles. L'élève peut penser spontanément à des raccourcissements (craquage) ou des allongements de squelette carboné. Il peut être amené à envisager ensuite les modifications de chaîne qui conservent le nombre d'atomes de carbone (reformage). Toutes ces notions sont reprises et approfondies dans l'**activité 1**.

SITUATION 2

Cette situation s'appuie sur un acquis de Première S, à savoir l'oxydation ménagée d'un alcool primaire en acide carboxylique. Après avoir écrit les formules semi-développées de l'éthanol et de l'acide éthanoïque, l'élève est amené à remarquer que seul le groupe caractéristique de la molécule est modifié, et pas son squelette carboné. Cette notion est reprise dans l'**activité 2** dans le cas des molécules polyfonctionnelles que sont le glucose et le fructose.

SITUATION 3

À travers la présentation d'une étape de la synthèse d'un médicament antitumoral, cette situation a pour objectif de montrer que le symbole « + » en chimie ne revêt pas la même signification qu'en mathématiques. Ici, cette équation ne porte pas le nom d'addition car la molécule d'eau ne vient pas « s'ajouter » au réactif bromé. C'est le groupe hydroxyle qui vient se substituer à l'atome de brome : cette réaction porte donc le nom de substitution. La substitution et l'addition, ainsi que l'élimination, sont détaillées dans l'**activité 3**.

ACTIVITÉS

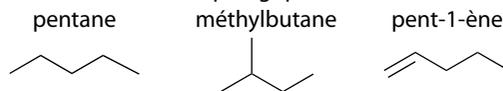
ACTIVITÉ 1

Le pétrole, c'est raffiné !

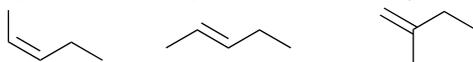
p. 292

1. La distillation est une technique de séparation de liquides miscibles ayant des températures d'ébullition différentes. À la différence de la distillation simple, la distillation fractionnée utilise une colonne de fractionnement (ou colonne de Vigreux), améliorant ainsi la qualité de la séparation.
2. On dit qu'un carburant a un indice d'octane de 95 lorsque celui-ci se comporte, au point de vue auto-allumage, comme un mélange de 95 % de 2,2,4-triméthylpentane, qui est résistant à l'auto-inflammation (son indice d'octane est de 100) et de 5 % d'heptane, qui lui s'auto-enflamme facilement (son indice d'octane est de 0).

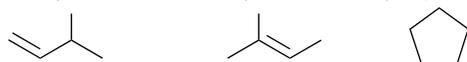
3. a. Les formules topologiques sont les suivantes :



(Z)-pent-2-ène (E)-pent-2-ène 2-méthylbut-1-ène



3-méthylbut-1-ène méthylbut-2-ène cyclopentane



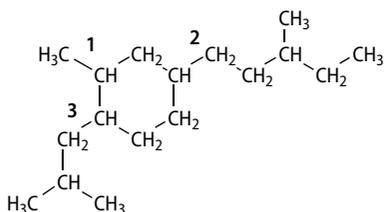
b. Méthylbutane : isomérisation.

Pent-1-ène et pent-2-ène : déshydrogénation.

2-Méthylbut-1-ène, 3-méthylbut-1-ène et méthylbut-2-ène : isomérisation et déshydrogénation.

Cyclopentane : cyclisation.

4. a.



Les liaisons **1**, **2** et **3** sont « cassées » lors du craquage.

b. Ce sont le méthylpropène et le 3-méthylpent-1-ène.

c. Elles sont conjuguées.

5. C'est le nombre d'atomes de carbone de la molécule.

6. Une modification de chaîne peut se faire avec :

- conservation du nombre d'atomes de carbone ;
- diminution du nombre d'atomes de carbone (raccourcissement de chaîne) ;
- augmentation du nombre d'atomes de carbone (allongement de chaîne).

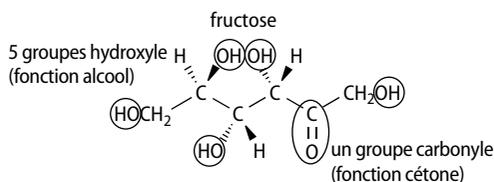
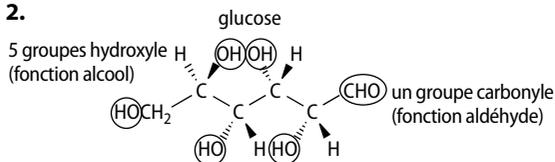
ACTIVITÉ 2

Du glucose au fructose...

p. 293

1. L'adjectif « seule » n'est pas pertinent dans la mesure où une espèce chimique moléculaire (ici « sucre ») n'est jamais constituée d'une seule molécule mais de centaines de milliers de milliards de milliards de molécules (ordre de grandeur de la constante d'Avogadro). Cet adjectif est employé ici pour le glucose par comparaison au saccharose, qui est un disaccharide comprenant deux entités : le glucose et le fructose.

2.



3. Le glucose est un aldose car il contient la fonction chimique aldéhyde. Le fructose est un cétose car il contient la fonction chimique cétone.

4. La liqueur de Fehling est un test caractéristique des aldéhydes. Le test sera donc positif avec le glucose, et négatif avec le fructose.

5. a. Le glucose et le fructose ont la même formule brute $C_6H_{12}O_6$.

b. Le glucose et le fructose sont donc des isomères.

c. Le sirop de glucose-fructose est obtenu à partir du sirop de glucose par « isomérisation » du glucose en fructose, d'où le nom d'isoglucose (mélange de glucose et de son isomère, le fructose).

6. C'est la chaîne carbonée.

7. Deux fonctions chimiques sont modifiées : l'aldéhyde est transformé en alcool primaire, et l'alcool secondaire est transformé en cétone.

ACTIVITÉ 3

Réactions autour du cyclohexanol

p. 294

1. a. La réaction **a** n'est pas une addition car elle ne correspond pas à la définition donnée : parmi les réactifs, il n'y a pas de molécule qui se scinde en deux fragments qui se fixeraient sur le cyclohexanol.

La réaction **a** est une substitution : le groupe d'atomes OH est remplacé par l'atome Cl.

b. Cette réaction met en jeu une modification de groupe caractéristique : le groupe hydroxyle du cyclohexanol est remplacé par le groupe chloro dans le chlorocyclohexane.

2. a. Le cyclohexanol subit à la fois une modification de squelette carboné (la chaîne cyclique devient linéaire) et de groupe caractéristique (disparition du groupe hydroxyle et création de deux groupes carboxyle).

b. Cette réaction ne peut être décrite par aucune des trois définitions proposées.

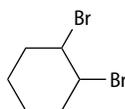
3. a. La réaction **c** correspond à une élimination : le cyclohexanol perd l'atome H et le groupe OH avec création d'une liaison supplémentaire en son sein.

b. Une molécule d'eau est éliminée lors de cette réaction.

4. L'eau de dibrome garde sa couleur rouge en présence de cyclohexane et devient incolore en présence de cyclohexène.

5. La seule différence entre le cyclohexane et le cyclohexène est la présence d'une liaison double dans le cyclohexène ; c'est donc sur cette liaison double C=C que se fixe le dibrome.

6.



7. La réaction **d** correspond à une addition.

8. La réaction **a** est une substitution : l'atome Cl remplace le groupe d'atomes OH dans le cyclohexanol.

La réaction **b** est une addition : le dibrome Br₂ se scinde en deux fragments Br, qui se fixent sur la double liaison du cyclohexène.

La réaction **c** est une élimination : le cyclohexanol perd un atome H et son groupe OH et il en résulte la création d'une liaison double en son sein.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : Reconnaître une modification de chaîne

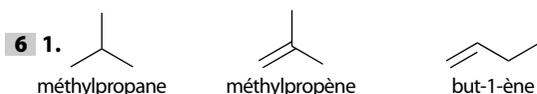
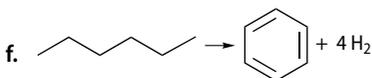
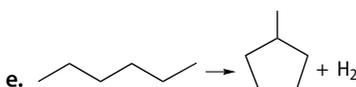
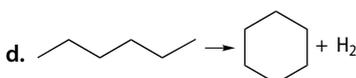
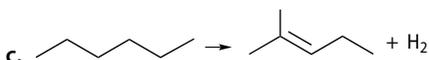
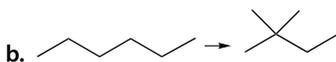
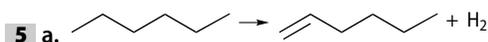
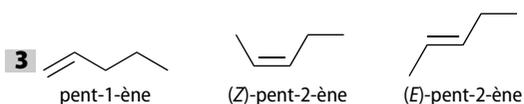
1. **Faux.** Il peut aussi augmenter ou diminuer.

2. **Vrai.**

3. **Vrai.**

4. **Faux.** L'octan-2-ol et l'octan-2-one ont la même chaîne carbonée et ne diffèrent que par la nature de leur groupe caractéristique.

2 a. Conservation. b. Diminution.
c. Conservation. d. Augmentation.

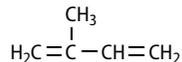


2. Le méthylpropane est obtenu par isomérisation. Le méthylpropène est obtenu par isomérisation et déshydrogénation.

Le but-1-ène, le (E)-but-2-ène et le (Z)-but-2-ène sont obtenus par déshydrogénation.

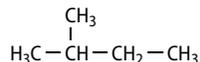
7 Les deux réactions possibles ont pour équation $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3 \rightarrow \text{H}_3\text{C}-\text{CH}_3 + \text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$ et $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{CH}_3$.

8 1. La formule semi-développée de l'isoprène est :



2. Les deux doubles liaisons de cette molécule sont séparées par une seule liaison simple : elles sont donc conjuguées.

3. Cet alcane est le 2-méthylbutane, de formule semi-développée :



4. Cette réaction met en jeu un allongement de chaîne : le produit comporte plus d'atomes de carbone que le réactif.

COMPÉTENCE 2 : Reconnaître une modification de groupe caractéristique

9 1. **Vrai.**

2. **Faux.** Pas nécessairement.

3. **Vrai.**

10 La réaction **b.** met en jeu une modification de groupe caractéristique.

Le réactif **A** possède le groupe caractéristique carbonyle associé à la fonction chimique cétone.

Le produit **B** possède le groupe caractéristique hydroxyle associé à la fonction chimique alcool.

11 1. $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{OH}$



3. Le groupe caractéristique est l'hydroxyle dans l'éthanol, le carbonyle dans l'éthanal et le carboxyle dans l'acide éthanoïque.

12 Oxydation d'un alcool en cétone

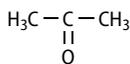
Un alcool, de formule brute $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$, est oxydé en cétone.

1. Préciser la nature du groupe caractéristique présent dans l'alcool et dans le produit formé.

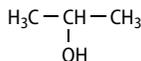
Le groupe caractéristique est l'hydroxyle dans l'alcool et le carbonyle dans la cétone.

2. Donner la formule semi-développée et le nom de l'alcool et du produit formé.

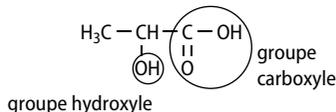
La cétone ne peut être que la propanone :



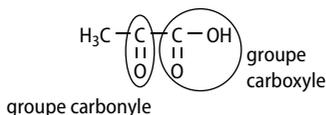
L'alcool est donc secondaire, c'est le propan-2-ol :



13 1.



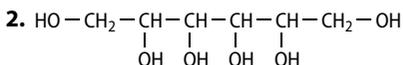
2. a.



b. Le groupe carbonyle dans l'acide pyruvique est modifié en groupe hydroxyle dans l'acide lactique.

14 1. a. Il est exact de le dire vu que le texte rapporte que « le sorbitol est environ 0,6 fois aussi sucré que le saccharose ».

b. Cela signifie qu'il faut utiliser une quantité double de sorbitol par rapport au saccharose pour avoir la même sensation sucrée.



3. Le sorbitol contient des groupes caractéristiques hydroxyle associés à plusieurs (six) fonctions alcool : c'est donc un polyol.

COMPÉTENCE 3 : Connaître les grandes catégories de réactions en chimie organique

15 1. a et b.

2. a et c.

3. a.

16 a. Élimination.

b. Addition.

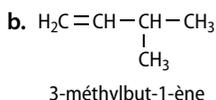
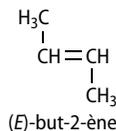
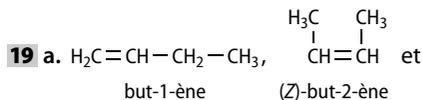
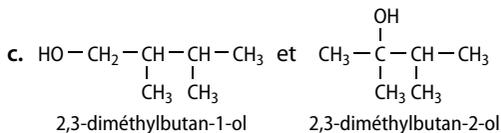
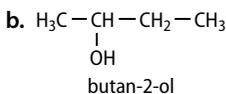
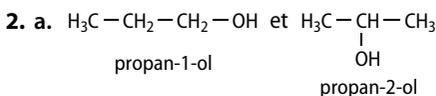
c. Substitution.

d. Élimination.

e. Aucune des trois catégories (combustion).

f. Élimination.

17 1. C'est une addition.



c. On n'obtient pas d'alcène par déshydratation du méthanol (on obtient en fait un éther, le diméthoxyde, par déshydratation intermoléculaire, voir exercice 29).

20 La matière qui contient du lycopène est rouge car cette molécule contient un nombre de doubles liaisons conjuguées suffisamment élevé pour absorber des radiations dont les longueurs d'onde se situent dans le visible. En présence de dibrome, le lycopène subit une réaction d'addition de deux atomes de brome sur les liaisons doubles C=C. Ces liaisons se transformant en liaisons simples C-C, le phénomène de conjugaison disparaît, et avec lui la couleur rouge de la solution organique.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

21 1. Les transformations a et b mettent en jeu une modification de chaîne.

La transformation c ne met pas en jeu la modification mais la formation d'un groupe caractéristique.

Les transformations d et e mettent en jeu une modification de groupe caractéristique.

2. La transformation d permet de passer d'un alcool (groupe hydroxyle) à une cétone (groupe carbonyle) et la transformation e permet de passer d'un alcool (groupe hydroxyle) à une amine (groupe amine).

22 1. a. Dans la morphine, on reconnaît deux groupes hydroxyle et un groupe amine (amine tertiaire).

Dans la codéine, on reconnaît un groupe hydroxyle et un groupe amine (amine tertiaire).

b. Ces molécules portent plusieurs groupes caractéristiques, associés à plusieurs fonctions chimiques différentes, elles sont donc polyfonctionnelles.

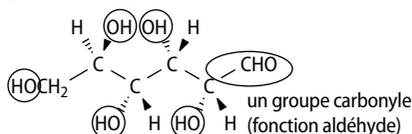
2. C'est une réaction de substitution.

3. a. La codéine a une action analgésique et antitussive.

b. On peut citer la dépendance physique et psychologique susceptible d'entraîner une toxicomanie.

23 1. a. C'est la représentation de Cram.

b. 5 groupes hydroxyle (fonction alcool)



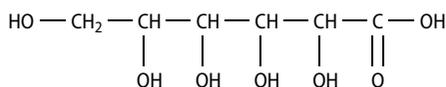
c. Ils sont asymétriques.

2. a. $C_6H_{12}O_6$.

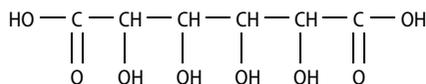
b. $C_6H_{12}O_6 + 6 O_2 \rightarrow 6 CO_2 + 6 H_2O$.



acide méthanoïque méthanal



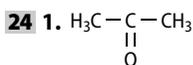
acide gluconique



acide glucarique

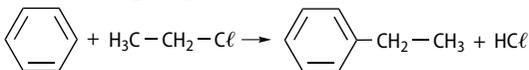
4. C'est le squelette carboné.

5. Un groupe caractéristique est modifié au cours de l'oxydation 4 (carbonyle en carboxyle) et deux groupes caractéristiques sont modifiés au cours de l'oxydation 5 (carbonyle en carboxyle et hydroxyle en carboxyle).

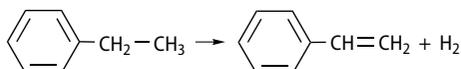


2. Voir tableau 1 à la fin de la séquence, p.128.

25 1. On peut décomposer la réaction en deux étapes :
 – une substitution au cours de laquelle un atome d'hydrogène du benzène est substitué par le groupe d'atomes CH_2-CH_3 :



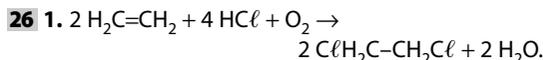
– une élimination au cours de laquelle une liaison simple C-C se transforme en liaison double C=C :



2. a. C'est une *addition* puisque la liaison double C=C du styrène se transforme en liaison simple C-C dans le polystyrène ; cette addition se produit *plusieurs fois* (n fois) : c'est donc une *polyaddition*.

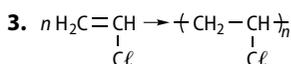
b. C'est une modification (allongement) de chaîne.

c. La masse molaire du motif est égale à $104,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, donc la masse molaire de ce polystyrène est égale à $2\,000 \times 104,0$ soit $2,080 \times 10^5 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.



2. a. $ClH_2C-CH_2Cl \rightarrow ClHC=CH_2 + HCl$.

b. C'est une élimination.



27 1. a. C'est le groupe carbonyle.

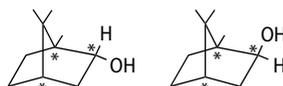


c. $C_{10}H_{16}O$;

$M_{\text{camphre}} = 10 \times 12,0 + 16 \times 1,0 + 16,0 = 152,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

2. a. C'est le groupe hydroxyle.

b. C'est une addition.



c. bornéol

isobornéol

d. Ces deux composés sont diastéréoisomères.

e. $C_{10}H_{18}O$;

$M_{\text{alcool}} = 10 \times 12,0 + 18 \times 1,0 + 16,0 = 154,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

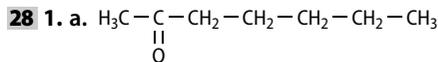
f. La quantité d'alcool maximale que l'on pourrait obtenir est :

$n_{\text{max}}(\text{alcool}) = x_{\text{max}} = n(\text{camphre}) = m_{\text{camphre}} / M_{\text{camphre}}$
 Soit une masse :

$$m_{\text{max}}(\text{alcool}) = (m_{\text{camphre}} / M_{\text{camphre}}) \cdot M_{\text{alcool}} = (1,50 / 152,0) \times 154,0 = 1,52 \text{ g}$$

D'où un rendement :

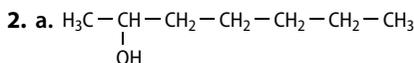
$R = m(\text{alcool}) / m_{\text{max}}(\text{alcool}) = 1,20 / 1,52 = 0,790$
 soit 79,0 %.



b. C'est le groupe carbonyle.

c. $C_7H_{14}O$.

d. $M_{\text{heptan-2-one}} = 7 \times 12,0 + 14 \times 1,0 + 16,0 = 114,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

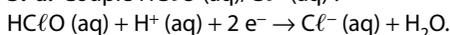


b. C'est l'heptan-2-ol.

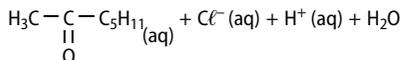
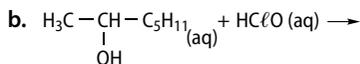
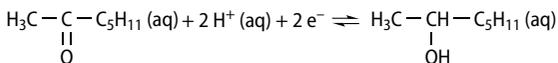
c. $C_7H_{16}O$.

d. $M_{\text{heptan-2-ol}} = 7 \times 12,0 + 16 \times 1,0 + 16,0 = 116,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

3. a. Couple $HClO(aq) / Cl^-(aq)$:



Couple heptan-2-one (aq) / A (aq) :



c. C'est une élimination.

4. a. Voir tableau 2 à la fin de la séquence.

b. Si l'alcool est le réactif limitant, alors :

$$x_{\text{max}} = 3,4 \times 10^{-2} \text{ mol};$$

si l'acide hypochloreux est le réactif limitant, alors :

$$x_{\text{max}} = 5,4 \times 10^{-2} \text{ mol}.$$

$3,4 \times 10^{-2} < 5,4 \times 10^{-2}$: c'est donc bien l'alcool qui est le réactif limitant.

c. La masse maximale d'heptan-2-one que l'on peut obtenir par cette transformation est :

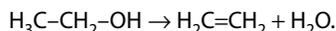
$$m_{\text{max}}(\text{heptan-2-one}) = x_{\text{max}} \cdot M_{\text{heptan-2-one}} = 3,4 \times 10^{-2} \times 114,0 = 3,9 \text{ g}.$$

d. Le rendement est :

$$R = m(\text{heptan-2-one})/m_{\text{max}}(\text{heptan-2-one}) = 2,4/3,9 = 0,61 \text{ soit } 61 \text{ \%}.$$

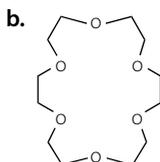
EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

29 1. a. Les deux produits formés sont de l'éthylène (éthène) et de l'eau :



b. C'est une *déshydratation* puisque l'eau fait partie des produits de réaction ; l'eau est éliminée entre deux molécules d'éthanol : c'est donc une *déshydratation intermoléculaire*.

2. a. C'est une substitution car l'atome de chlore est remplacé par le groupe d'atomes $\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$.



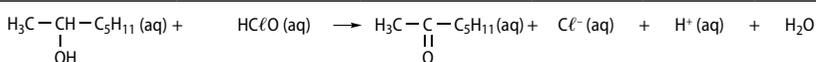
c. Cette molécule a la forme d'une couronne qui contient 18 atomes dont 6 atomes d'oxygène.

d. Ce sont des interactions électrostatiques entre le cation métallique K^+ et les doublets non liants des six atomes d'oxygène.

1 Tableau de l'exercice 24, question 2

	réaction 1	réaction 2	réaction 3	réaction 4
a. Formule semi-développée	$\text{Br}-\text{CH}_2-\underset{\text{O}}{\underset{ }{\text{C}}}-\text{CH}_3$	$\text{H}_3\text{C}-\underset{\text{O}}{\underset{ }{\text{C}}}-\text{CH}_2-\underset{\text{OH}}{\underset{ }{\text{C}}}-\text{CH}_3$	$\text{H}_3\text{C}-\underset{\text{O}}{\underset{ }{\text{C}}}-\text{CH}=\underset{\text{CH}_3}{\text{C}}-\text{CH}_3$	$\text{H}_3\text{C}-\underset{\text{OH}}{\underset{ }{\text{C}}}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3$
b. Modification de chaîne	non	oui : allongement de la chaîne	oui : création d'une liaison double $\text{C}=\text{C}$	oui : allongement de la chaîne
c. Catégorie de réaction	substitution	addition (une liaison double $\text{C}=\text{O}$ devient liaison simple $\text{C}-\text{O}$).	élimination	addition

2 Tableau de l'exercice 28, question 4.a.



État	x (mol)	Quantités de matière (mol)					
		initial	$x = 0$	$3,4 \times 10^{-2}$	$5,4 \times 10^{-2}$	0	0
en cours	x	$3,4 \times 10^{-2} - x$	$5,4 \times 10^{-2} - x$	x	x	x	excès
final	x_{max}	$3,4 \times 10^{-2} - x_{\text{max}}$	$5,4 \times 10^{-2} - x_{\text{max}}$	x_{max}	x_{max}	x_{max}	excès

Déplacements d'électrons en chimie organique

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
Aspect microscopique : – liaison polarisée, site donneur et site accepteur de doublet d'électrons ; – interaction entre des sites donneurs et accepteurs de doublet d'électrons ; représentation du mouvement d'un doublet d'électrons à l'aide d'une flèche courbe lors d'une étape d'un mécanisme réactionnel.	– Déterminer la polarisation des liaisons en lien avec l'électronégativité (table fournie). – Identifier un site donneur, un site accepteur de doublet d'électrons. – Pour une ou plusieurs étapes d'un mécanisme réactionnel donné, relier par une flèche courbe les sites donneur et accepteur en vue d'expliquer la formation ou la rupture de liaisons.

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Déterminer la polarisation des liaisons en lien avec l'électronégativité.
2. Identifier les sites donneurs ou accepteurs de doublet d'électrons.
3. Représenter le mouvement d'un doublet d'électrons à l'aide d'une flèche courbe.

Évaluation diagnostique

p. 306

SITUATION 1

Partant d'un lien concret avec la spectroscopie infrarouge vue auparavant par les élèves, cette situation s'appuie sur le cas « limite » de la liaison ionique présente dans le fluorure de césium, solide ionique possédant les atomes dont la différence d'électronégativité est la plus élevée. Centrée sur les travaux de Pauling, l'**activité 1** reprend la notion d'électronégativité vue en classe de Première S, réinvestie et approfondie en classe de Terminale S en lien avec la polarisation d'une liaison chimique.

SITUATION 2

Cette situation présente la représentation de Lewis d'une espèce chargée et d'une liaison polarisée, et a pour objectif d'introduire les notions de sites donneurs et sites accepteurs de doublet d'électrons. L'ion hydrure, porteur d'un doublet non liant, est aisément identifiable en tant que site donneur. La fonction cétone, quant à elle, présente deux sites donneurs, localisés sur

l'atome d'oxygène porteur de deux doublets non liants d'une part et entre les atomes de carbone et d'oxygène (liaison double) d'autre part. Elle présente aussi un site accepteur localisé sur l'atome de carbone porteur d'une charge partielle positive δ^+ du fait de la polarisation de la liaison C=O. Les notions de sites donneurs et accepteurs de doublet d'électrons, en lien avec le modèle de la flèche courbe qui permet de les relier, sont approfondies dans l'**activité 3**.

SITUATION 3

L'étape de protonation du propène est écrite dans cette situation en utilisant une flèche courbe qui relie un site donneur et un site accepteur de doublet d'électrons, ici le doublet liant de la liaison double C=C et le proton. L'élève doit admettre dès le départ que cette flèche, un des outils les plus importants utilisés en chimie organique, ne décrit pas le mouvement d'un atome mais le mouvement d'un doublet d'électrons.

L'**activité 2** introduit ce modèle de la flèche courbe, utilisé ensuite dans l'**activité 3** pour l'écriture d'étapes de mécanismes réactionnels.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

Électronégativité de Pauling et polarisation de liaison

p. 308

1. a. Marie Curie a reçu le prix Nobel de Physique en 1903 (partagé avec son mari Pierre Curie) et le prix Nobel de Chimie en 1911.

b. Pauling a reçu le prix Nobel de Chimie en 1954 pour ses travaux de recherche sur la nature de la liaison chimique appliqués à la détermination de la structure de molécules complexes.

c. L'ADN n'a pas une structure en triple hélice, mais en double hélice.

2. a. Il a ajouté 2,05 aux valeurs de l'ancienne échelle pour obtenir la nouvelle.

b. L'intérêt est que toutes les valeurs d'électronégativité sont alors strictement positives.

3. a. L'élément d'électronégativité la plus faible est le césium (Cs). L'élément d'électronégativité la plus forte est le fluor (F).

b. L'électronégativité augmente de gauche à droite le long d'une ligne (période) et de bas en haut le long d'une colonne (famille).

c. Les gaz rares n'étant pas engagés dans des liaisons, l'échelle de Pauling ne leur attribue pas de valeur d'électronégativité.

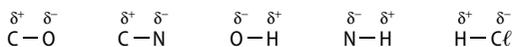
d. L'élément carbone, d'électronégativité égale à 2,55, se situe « au milieu » de l'échelle d'électronégativité (de 0,79 à 3,98).

4. a. La différence d'électronégativité entre les deux atomes d'hydrogène est nulle : la liaison H-H n'est donc pas polarisée. La différence d'électronégativité entre le carbone et l'hydrogène est égale à 0,35 : la liaison C-H est donc très faiblement polarisée.

b. La différence d'électronégativité entre le sodium et le fluor est égale à 3,05 (forte). Dans le solide NaF, les liaisons entre cations Na^+ et anions F^- sont donc ioniques.

c. Le carbone se situant au milieu de l'échelle d'électronégativité, aucun autre élément ne peut avoir avec lui une très grande différence d'électronégativité.

5. Les différences d'électronégativités dans les cinq liaisons proposées ont des valeurs intermédiaires, respectivement égales à 0,89 ; 0,49 ; 1,24 ; 0,84 ; 0,96. Ces liaisons sont donc polarisées de la façon suivante :



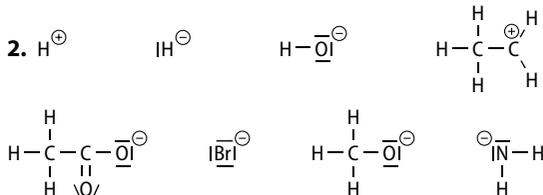
ACTIVITÉ 2

Mouvement d'un doublet d'électrons p. 310

1. Dans la représentation de Lewis de l'ion chlorure Cl^- , l'atome de chlore a perdu un doublet liant (en passant de 1 à 0 doublet liant) et a gagné un doublet non liant (en passant de 3 à 4 doublets non liants) : il porte donc une charge \ominus .

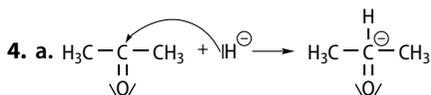
Dans la représentation de Lewis de l'ion ammonium NH_4^+ , l'atome d'azote a perdu un doublet non liant (en passant de 1 à 0 doublet non liant) et a gagné un doublet liant (en passant de 3 à 4 doublets liants) : il porte donc une charge \oplus .

Dans la représentation de Lewis de l'ion H_3C^+ , l'atome de carbone a perdu un doublet liant (en passant de 4 à 3 doublets liants) : il porte donc une charge \oplus .



3. a. La différence d'électronégativité entre C et O est égale à 0,89 : la liaison C=O est polarisée, le carbone porte une charge partielle δ^+ et l'oxygène porte une charge partielle δ^- .

b. Le carbone portant une charge partielle δ^+ , il constitue un site déficient en électrons vers lequel va se déplacer le doublet non liant porté par H^- .



b. L'atome de carbone central porte une charge \ominus .

c. Cet atome est entouré de 5 doublets d'électrons : il ne respecte pas la règle de l'octet.

d. L'arrivée de la flèche 1 sur l'atome de carbone déclenche le départ de la flèche 2 afin que le carbone ne porte pas de charge négative défavorable et qu'il respecte la règle de l'octet.

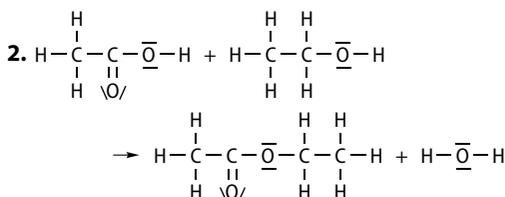
5. Lors d'une étape de formation de liaison, le doublet d'électrons qui se déplace est initialement un doublet non liant (fig. 3) ou un doublet liant (fig. 4). Lors d'une étape de rupture de liaison, le doublet d'électrons qui se déplace est initialement un doublet liant (fig. 4).

ACTIVITÉ 3

Sites donneurs et accepteurs de doublet d'électrons

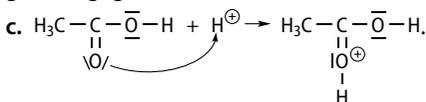
p. 311

1. L'éthanol et l'acide éthanoïque étant solubles dans l'eau salée, le surnageant observé après l'ajout d'eau salée est une phase organique constituée d'acétate d'éthyle. L'intérêt de l'étape de relargage est donc de diminuer la solubilité, dans le milieu réactionnel, de l'ester formé.



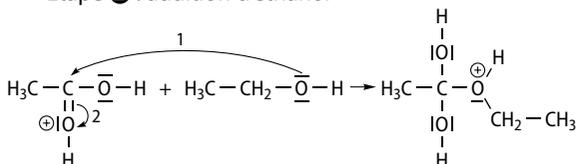
3. a. Le proton H^+ porte une charge entière positive : c'est un site accepteur de doublet d'électrons.

b. Dans la molécule d'acide éthanoïque, le site donneur du doublet d'électrons permettant d'expliquer la formation de la liaison entre O et H est l'atome d'oxygène engagé dans la liaison double C=O.



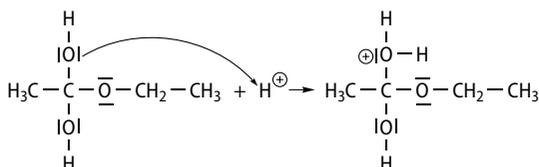
4. a. et b.

• Étape ② : addition d'éthanol



La flèche 1 relie les sites donneur et accepteur de doublet d'électrons, et déclenche le départ de la flèche 2.

• Étape ④ : protonation



5. Un site donneur de doublet d'électrons peut être localisé sur un atome possédant un doublet non liant (cas de l'oxygène dans les étapes ①, ② et ④) ; il peut être également localisé entre deux atomes (doublet liant).

6. Un site accepteur de doublet d'électrons peut être localisé sur un atome possédant une charge entière positive (cas de H^+ dans les étapes ① et ④) ou sur l'atome d'une liaison polarisée possédant une charge partielle positive δ^+ (cas du carbone dans l'étape ②).

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : Déterminer la polarisation des liaisons en lien avec l'électronégativité

1. **Faux.** L'électronégativité traduit la tendance d'un atome à attirer à lui les électrons de la liaison dans laquelle il est engagé.

2. **Vrai.**

3. **Faux.** La liaison est ionique si les atomes ont une très forte différence d'électronégativité, supérieure à 2,0.

4. **Vrai.**

2 1. a. Les atomes doivent être identiques ou avoir une différence d'électronégativité inférieure à 0,3.

b. Les atomes doivent avoir une différence d'électronégativité comprise entre 0,3 et 2,0.

c. Les atomes doivent avoir une différence d'électronégativité supérieure à 2,0.

2. a. H-H ou B-H.

b. C-F.

c. Na-F.

4 1. Les liaisons apolaires sont $\text{N}\equiv\text{N}$ et $\text{O}=\text{O}$.

2. Les liaisons polarisées sont $\overset{\delta^+}{\text{C}}-\overset{\delta^-}{\text{F}}$ et $\overset{\delta^+}{\text{H}}-\overset{\delta^-}{\text{Cl}}$.

5 1. Les électronégativités de l'hydrogène et du tellure sont quasiment égales.

2. L'électronégativité de l'hydrogène est plus grande que celle du calcium.

3. L'électronégativité de l'hydrogène est plus faible que celle de l'iode.

4. Le classement par électronégativité croissante est : $\text{Ca} < \text{H} \approx \text{Te} < \text{I}$.

6 Échelles d'électronégativité de Pauling

1. a. En utilisant l'ancienne échelle ci-dessus établie par Pauling, donner la valeur de l'électronégativité du phosphore, de l'oxygène et du fluor.

L'électronégativité vaut 0,1 pour P, 1,4 pour O et 2,0 pour F.

b. Déterminer la différence d'électronégativité entre le phosphore et l'oxygène, et entre l'oxygène et le fluor.

La différence d'électronégativité vaut 1,3 entre P et O, et 0,6 entre O et F.

2. Répondre aux mêmes questions en utilisant la nouvelle échelle de Pauling, utilisée actuellement.

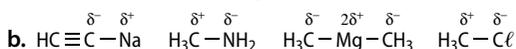
L'électronégativité vaut 2,1 pour P, 3,4 pour O et 4,0 pour F.

La différence d'électronégativité vaut 1,3 entre P et O, et 0,6 entre O et F.

3. Le choix d'une de ces deux échelles est-il important pour la prévision de la polarisation d'une liaison chimique ?

Non, car la différence d'électronégativité entre deux atomes ne change pas d'une échelle à l'autre, et c'est cette différence qui permet de prévoir la polarisation d'une liaison.

7 1. a. Non, la liaison C-S n'est pas polarisée car C et S ont la même électronégativité.



2. $\text{H}_3\text{C}-\text{Cl} > \text{H}_3\text{C}-\text{NH}_2 > \text{H}_3\text{C}-\text{Mg}-\text{CH}_3 > \text{HC}\equiv\text{C}-\text{Na}$.

COMPÉTENCE 2 : Identifier les sites donneurs ou accepteurs de doublet d'électrons

8 1. a. **Faux.** Un site donneur de doublet d'électrons est un site de forte densité électronique.

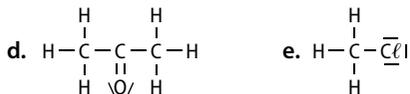
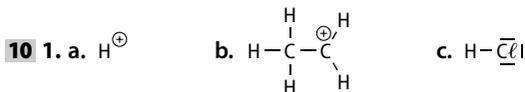
b. **Vrai.**

c. *Faux*. Un site donneur de doublet d'électrons peut aussi appartenir à une espèce non chargée.

2. a. *Faux*. Un site accepteur de doublet d'électrons peut aussi être localisé sur l'atome d'une liaison polarisée possédant une charge partielle positive δ^+ .

b. *Vrai*.

c. *Faux*. C'est un site donneur de doublet d'électrons qui peut être localisé entre deux atomes.



2. c. $\text{H}-\overset{\delta^+}{\text{C}}-\overset{\ominus}{\text{Cl}}$: l'électronégativité du chlore est plus grande que celle de l'hydrogène.



e. $\text{H}-\overset{\delta^+}{\text{C}}-\overset{\ominus}{\text{Cl}}$: l'électronégativité du chlore est plus grande que celle du carbone.

3. a. Atome d'hydrogène.

b. Atome de carbone porteur d'une charge entière positive.

c. Atome d'hydrogène porteur d'une charge partielle δ^+ .

d. Atome de carbone porteur d'une charge partielle δ^+ .

e. Atome de carbone porteur d'une charge partielle δ^+ .

COMPÉTENCE 3 : Représenter le mouvement d'un doublet d'électrons à l'aide d'une flèche courbe

11 1. c.

2. c.

3. b.

12 Trouver les erreurs

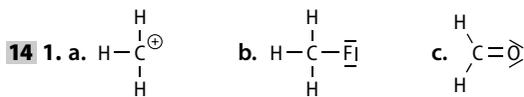
Parmi les propositions suivantes utilisant le modèle de la flèche courbe, trouver laquelle est correcte, et expliquer pourquoi les autres sont fausses.

C'est la proposition c. qui est correcte.

La proposition a. est incorrecte car la flèche part du site accepteur et pointe vers le site donneur.

La proposition b. est incorrecte car la flèche part de la charge \ominus du site donneur.

La proposition d. est incorrecte car la flèche part de l'atome du site donneur.



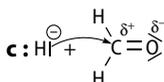
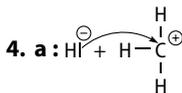
2. b. $\text{H}-\overset{\delta^+}{\text{C}}-\overset{\ominus}{\text{F}}$: l'électronégativité du fluor est plus grande que celle du carbone.

c. $\text{H}-\overset{\delta^+}{\text{C}}=\overset{\ominus}{\text{O}}$: l'électronégativité de l'oxygène est plus grande que celle du carbone.

3. a : atome de carbone porteur d'une charge entière positive.

b : atome de carbone porteur d'une charge partielle δ^+ .

c : atome de carbone porteur d'une charge partielle δ^+ .



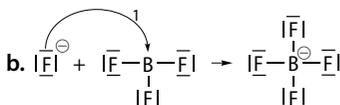
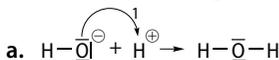
5. Le carbone ne vérifie pas la règle de l'octet dans l'espèce a., car il est entouré de trois doublets liants et non de quatre.

6. Dans les cas b. et c., l'arrivée de la flèche courbe sur l'atome de carbone déclenche le départ d'une autre flèche afin que le carbone respecte la règle de l'octet :

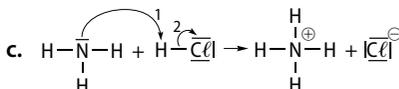


EXERCICES DE SYNTHÈSE

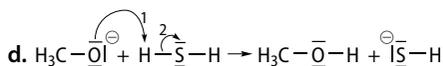
15 (flèches 1 en rouge et flèches 2 en bleu)



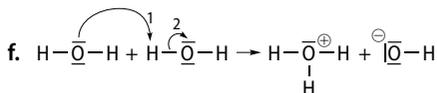
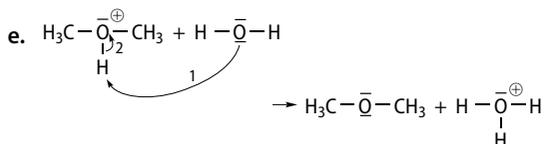
Le site accepteur est l'atome de bore, porteur d'une charge partielle positive du fait de la polarisation de la liaison B-F (différence d'électronégativité égale à 2,0 entre B et F).



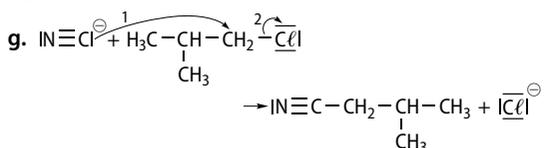
Le site accepteur est l'atome d'hydrogène, porteur d'une charge partielle positive du fait de la polarisation de la liaison H-Cl (différence d'électronégativité égale à 1,0 entre H et Cl).



Le site accepteur est l'atome d'hydrogène, porteur d'une charge partielle positive du fait de la polarisation de la liaison H-S (différence d'électronégativité égale à 0,4 entre H et S).



Le site accepteur est l'atome d'hydrogène, porteur d'une charge partielle positive du fait de la polarisation de la liaison H-O (différence d'électronégativité égale à 1,2 entre H et O).



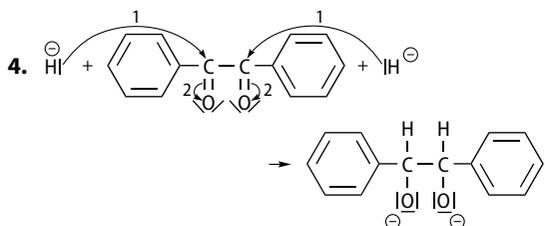
Le site accepteur est l'atome de carbone, porteur d'une charge partielle positive du fait de la polarisation de la liaison C-Cl (différence d'électronégativité égale à 0,6 entre C et Cl).

16 1. L'ion hydruure H^- est un site donneur de doublet d'électrons.

2. La différence d'électronégativité entre les deux atomes mis en jeu dans la liaison C=O est égale à 0,8. Cette liaison est donc polarisée de la façon suivante :



3. Le carbone porte une charge partielle positive : c'est un site accepteur de doublet d'électrons.

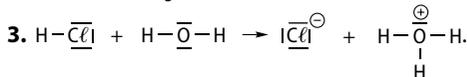


Les flèches 1 relient les sites donneur et accepteur de doublet d'électrons, et déclenchent le départ des flèches 2.

(flèches 1 en rouge et flèches 2 en bleu)

17 1. Le chlorure d'hydrogène gazeux se dissout dans l'eau, provoquant une dépression et donc une aspiration d'eau dans le ballon.

2. Le test au nitrate d'argent met en évidence la présence des ions chlorure Cl^- . La couleur jaune de la solution dans le ballon met en évidence la présence des ions oxonium H_3O^+ .

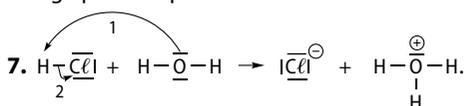


4. Dans la molécule d'eau, le site donneur de doublet d'électrons est l'atome d'oxygène porteur de deux doublets non liants.

5. La différence d'électronégativité entre les deux atomes mis en jeu dans la liaison H-Cl est égale à 1,0. Cette liaison est donc polarisée de la façon suivante :



6. Dans cette molécule, le site accepteur de doublet d'électrons est l'atome d'hydrogène porteur d'une charge partielle positive.



(flèche 1 en rouge et flèche 2 en bleu)

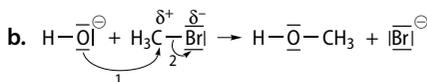
8. L'arrivée de la flèche sur l'atome d'hydrogène (flèche 1) déclenche le départ d'une autre flèche (flèche 2) depuis le doublet liant de la liaison H-Cl vers l'atome de chlore.

18 1. a. La différence d'électronégativité entre les deux atomes mis en jeu dans la liaison C-Br est égale à 0,4. Cette liaison est donc polarisée de la façon suivante :



b. Sur cette liaison, le site accepteur de doublet d'électrons est l'atome de carbone, porteur d'une charge partielle positive.

2. a. Sur l'ion hydroxyde, le site donneur de doublet d'électrons est l'atome d'oxygène, porteur de trois doublets non liants.



(flèche 1 en rouge et flèche 2 en bleu)

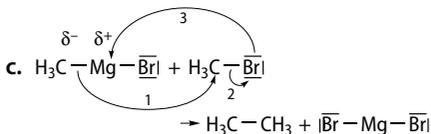
La flèche 1 relie les sites donneur et accepteur de doublet d'électrons, et déclenche le départ de la flèche 2.

c. C'est le méthanol.

3. a. La différence d'électronégativité entre les deux atomes mis en jeu dans la liaison C-Mg est égale à 1,3. Cette liaison est donc polarisée de la façon suivante :



b. Dans la molécule de bromure de méthylmagnésium, le site donneur du doublet d'électrons permettant d'expliquer la formation de la liaison C-C est situé entre l'atome de carbone et l'atome de magnésium (doublet liant).



(flèche 1 en rouge et flèche 2 en bleu)

La flèche 1 relie les sites donneur et accepteur de doublet d'électrons, et déclenche les départs successifs des flèches 2 et 3.

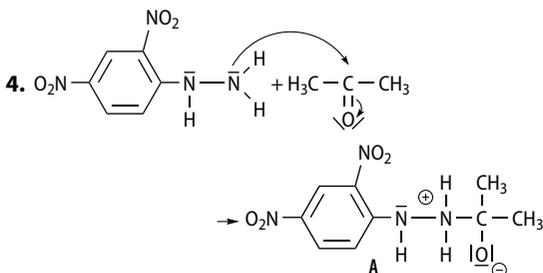
d. C'est l'éthane.

19 1. Dans la molécule de 2,4-DNPH, le site donneur du doublet d'électrons permettant d'expliquer la formation de la liaison entre N et C est l'atome d'azote du groupe -NH₂.

2. La différence d'électronégativité entre les deux atomes mis en jeu dans la liaison C=O est égale à 0,8. Cette liaison est donc polarisée de la façon suivante :

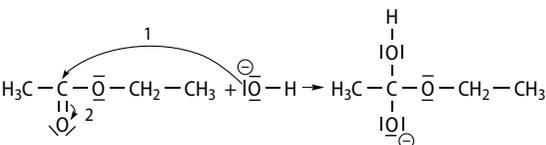


3. Le carbone porte une charge partielle positive : c'est un site accepteur de doublet d'électrons.



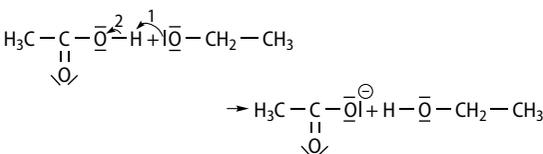
(flèche de gauche en rouge et flèche de droite en bleu)

20 1. et 2. • Étape 1 : addition de l'ion hydroxyde



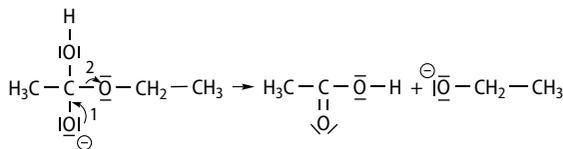
La flèche 1 relie les sites donneur et accepteur de doublet d'électrons, et déclenche le départ de la flèche 2.

• Étape 3 : échange de proton



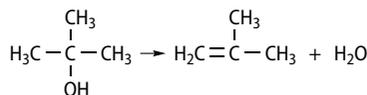
La flèche 1 relie les sites donneur et accepteur de doublet d'électrons, et déclenche le départ de la flèche 2. (flèche 1 en rouge et flèche 2 en bleu)

1. et 3. • Étape 2 : élimination de l'éthanolate



La flèche 1 déclenche le départ de la flèche 2. (les deux flèches sont en rouge)

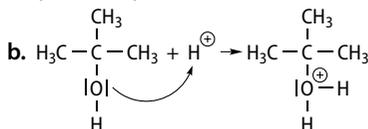
21 1. L'équation associée à la réaction de déshydratation du méthylpropan-2-ol est :



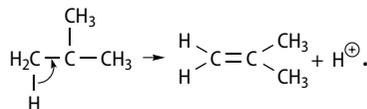
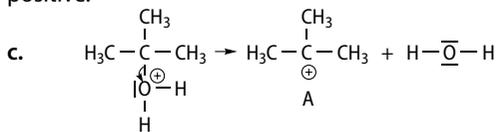
2. a. Étape 1 : protonation.

Étape 2 : élimination d'eau.

Étape 3 : déprotonation.



Dans l'étape 1, le site donneur de doublet d'électrons est l'atome d'oxygène porteur de deux doublets non liants ; le site accepteur de doublet d'électrons est l'atome d'hydrogène porteur d'une charge entière positive.

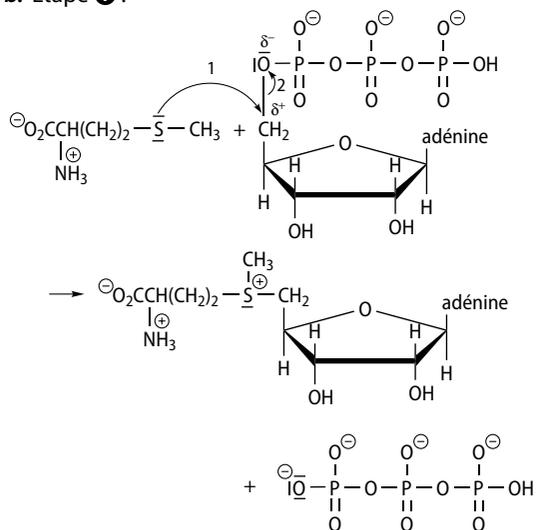


22 1. Un agent méthyliant est un composé qui apporte un groupe méthyle.

2. a. Dans l'étape 1, le site donneur de doublet d'électrons est l'atome de soufre de la méthionine (porteur de deux doublets non liants) et le site accepteur de doublet d'électrons est l'atome de carbone de l'ATP (porteur d'une charge partielle positive en raison de la polarisation de la liaison C-O).

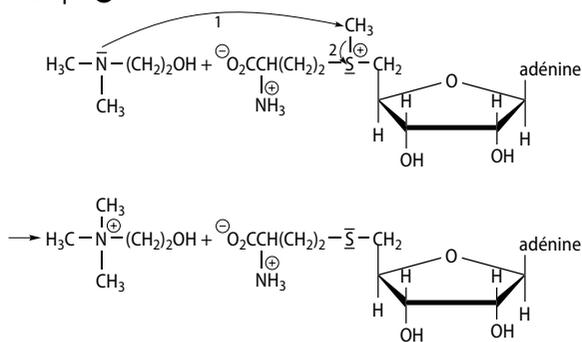
Dans l'étape 2, le site donneur de doublet d'électrons est l'atome d'azote du 2-(N,N-diméthylamino)éthanol (porteur d'un doublet non liant) et le site accepteur de doublet d'électrons est l'atome de carbone de la S-adenosylméthionine engagé dans la liaison C-S.

b. Étape ① :



(flèche 1 en rouge et flèche 2 en bleu)

Étape ② :



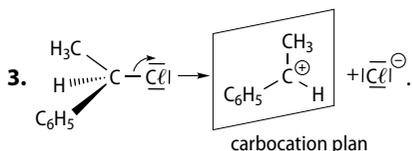
(flèche 1 en rouge et flèche 2 en bleu)

Pour les étapes ① et ②, la flèche 1 relie les sites donneur et accepteur de doublet d'électrons, et déclenche le départ de la flèche 2.

EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

23 1. L'atome de carbone central de la molécule **A** est asymétrique.

2. Cette molécule est donc chirale.

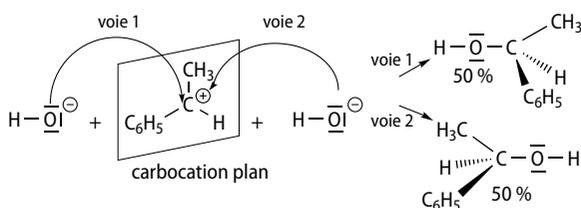


4. a. $\text{H} - \overset{\ominus}{\text{O}}\text{I}^{\ominus}$

b. Sur l'ion hydroxyde, le site donneur de doublet d'électrons est l'atome d'oxygène porteur de trois doublets non liants.

c. Dans le carbocation, le site accepteur de doublet d'électrons est l'atome de carbone porteur d'une charge entière positive.

d. L'attaque de l'ion hydroxyde sur le carbocation se fait de façon équiprobable de chaque côté du plan : on obtient bien un mélange racémique, constitué de 50 % de chaque alcool énantiomère.



Acides et bases

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
<ul style="list-style-type: none"> – Le pH : définition, mesure. – Théorie de Brønsted : acides faibles, bases faibles ; notion d'équilibre ; couple acide-base ; constante d'acidité K_a. Échelle des pK_a dans l'eau, produit ionique de l'eau ; domaines de prédominance (cas des acides carboxyliques, des amines, des acides α-aminés). 	<ul style="list-style-type: none"> – <i>Mesurer le pH d'une solution aqueuse.</i> – Reconnaître un acide, une base dans la théorie de Brønsted. – Utiliser les symbolismes \rightarrow, \leftarrow et \rightleftharpoons dans l'écriture des réactions chimiques pour rendre compte des situations observées. – Identifier l'espèce prédominante d'un couple acide-base connaissant le pH du milieu et le pK_a du couple. – <i>Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour déterminer une constante d'acidité.</i>

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Définir le pH d'une solution aqueuse.
2. Connaître la notion d'équilibre acido-basique.
3. Identifier l'espèce prédominante d'un couple acide-base en solution.

Évaluation diagnostique

p. 324

SITUATION 1

L'eau et en particulier celle d'une piscine évoque la détente mais aussi la vie quotidienne. Le pH de l'eau, qui est une notion de chimie, est donc relié à notre vie quotidienne.

L'espèce chimique liée au pH de l'eau de la piscine est l'ion oxonium H_3O^+ .

L'**activité 1** permet de découvrir la définition d'un acide et d'une base dans l'eau, ainsi que la définition mathématique du pH : $pH = -\log [H_3O^+]$.

SITUATION 2

Des solutions contenant des acides différents avec des concentrations molaires identiques donnent très souvent des solutions de pH différents. Les acides ne se dissocient pas de la même manière en solution aqueuse. Ainsi, certains acides sont plus forts que d'autres.

L'**activité 2** permet de découvrir que les réactions ne sont pas toujours totales et que, pour une réaction donnée, une constante caractéristique de la réaction peut être calculée, celle-ci ne dépendant pas des conditions initiales.

SITUATION 3

La couleur de la solution d'hélianthine dépend de son pH : elle est soit jaune, soit rouge, soit orange, qui est un mélange des deux couleurs précédentes. Cet indicateur coloré se trouve donc sous deux formes différentes selon le pH.

L'**activité 3** met en évidence la présence des deux espèces conjuguées d'un couple acide/base et montre que les réactions des acides ou des bases ne sont pas toujours totales avec l'eau. Lorsqu'il s'agit d'acides ou de bases faibles, cette transformation conduit à un équilibre, caractérisé par une constante d'acidité appelée K_a dans le cas des acides.

L'**activité 4** permet la validation expérimentale de la relation $pH = pK_a + \log [A^-]/[AH]$ en mesurant le pH de mélanges de solutions aqueuses d'acide éthanoïque et d'ions éthanoate de même concentration. Le pK_a de ce couple est déterminé graphiquement.

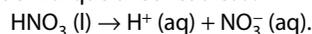
ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

L'évolution de la notion d'acide

p. 326

1. La réaction qui se produit selon Arrhenius dans le cas de l'acide nitrique avec l'eau est :



2. Brønsted et Lowry généralisent les définitions données par Arrhenius : un acide est une espèce pouvant céder un proton et une base est une espèce pouvant

capter un proton. Pour Brönsted et Lowry, l'acido-basité s'explique par échange de protons, alors que Arrhenius considère une libération de proton H^+ ou d'ions hydroxyde HO^- .

3. a. L'échelle de pH est liée à la concentration en ions hydrogène dans une solution aqueuse car les protons jouent un rôle essentiel dans l'acido-basité. Ce sont les espèces échangées lors d'une réaction acide-base.

b. Sørensen a formulé la définition $[H^+] = 10^{-pH}$.

c. Ainsi, quand le pH vaut 3,0, la concentration en ions hydrogène est $[H^+] = 10^{-3,0} = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot L^{-1}$.

d. Quand le pH vaut 4,0, la concentration en ions hydrogène est $[H^+] = 10^{-4,0} = 1,0 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot L^{-1}$.

La concentration en ions hydrogène est divisée par 10 lorsque le pH augmente d'une unité.

e. Le pH augmente d'une unité si la concentration est divisée par 10, ainsi, il augmente ici de 2 unités. Le pH de la solution vaut alors 6,0. La valeur du pH augmente faiblement alors que la concentration en ions hydrogène diminue fortement.

4. Comme la fonction logarithme \log est la fonction inverse de la fonction puissance de 10, alors :
 $\log(10^{-pH}) = -pH$.

5. D'après la question 4, $pH = -\log 10^{-pH}$. Or, d'après la question 3.b, $[H^+] = 10^{-pH}$, donc $pH = -\log [H^+]$.

En solution, l'ion hydrogène libéré s'unit à l'eau pour former un ion oxonium H_3O^+ . Il ne subsiste pas d'ions hydrogène, donc $pH = -\log [H_3O^+]$.

ACTIVITÉ 2

pH et équilibre chimique

p. 327

1. Voir fiche 8 page 584 du manuel élève.

2. a. Les élèves vont trouver une valeur de pH voisine de 2,9. Le pH est donc compris dans l'intervalle $[2,8 ; 3,0]$, ce qui conduit à un encadrement de la concentration en ions oxonium dans cette solution :

$$1,0 \times 10^{-3} < [H_3O^+] < 1,6 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot L^{-1}$$

b. On multiplie la concentration obtenue par le volume pour obtenir la quantité de matière moyenne d'ions oxonium : $n(H_3O^+) = 10^{-pH} \times V = 1,3 \times 10^{-4} \text{ mol}$.

3. $CH_3COOH(aq) + H_2O(l) \rightleftharpoons CH_3COO^-(aq) + H_3O^+(aq)$.

4. La quantité de matière d'acide éthanóique vaut :
 $n = c \cdot V = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol}$.

5. a.

État	x	CH_3COOH	$+ H_2O$	\rightleftharpoons	CH_3COO^-	$+ H_3O^+$
initial	0	$c \cdot V$	solvant		0	0
en cours	x	$c \cdot V - x$	solvant		x	x
final	$x_{\max} = c \cdot V$	$c \cdot V - x_{\max} = 0$	solvant		x_{\max}	x_{\max}

b. On peut normalement libérer une quantité $n = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol}$ d'ions oxonium si la réaction est totale.

c. La concentration $[H_3O^+]$ serait égale à c et le pH vaudrait alors 1,0 avec une réaction totale.

6. a. x_{\max} correspond à la valeur maximale de l'avancement soit $1,0 \times 10^{-2} \text{ mol}$ et x_f correspond à l'avancement réel. On trouve x_f grâce à la valeur du pH final qui est relié à la concentration en ions oxonium et au volume V :

$$x_f = [H_3O^+] \cdot V = 10^{-pH} \times V = 10^{-2,9} \times 0,100 = 1,3 \times 10^{-4} \text{ mol}$$

b. L'avancement final est nettement plus petit que l'avancement maximal : la réaction n'est pas totale. On peut alors placer une double flèche entre les réactifs et les produits.

7. a.

État	x	CH_3COOH	$+ H_2O$	\rightleftharpoons	CH_3COO^-	$+ H_3O^+$
initial	0	$c_1 \cdot V$	solvant		0	0
en cours	x	$c_1 \cdot V - x$	solvant		x	x
final	$x_{\max} = c_1 \cdot V$	$c_1 \cdot V - x_{\max} = 0$	solvant		x_{\max}	x_{\max}

b. L'avancement maximal de cette réaction vaut donc :

$$x_{\max} = c_1 \cdot V = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

c. La concentration $[H_3O^+]$ vaudrait alors $1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot L^{-1}$ et le pH serait égal à 2,0.

d. La quantité de matière d'ions oxonium réellement contenus dans un volume $V = 0,100 \text{ L}$ de solution de pH 3,4 serait $[H_3O^+] \cdot V = 10^{-pH} \times V = 4,0 \times 10^{-5} \text{ mol}$.

8. a. Les concentrations sont indiquées en $\text{mol} \cdot L^{-1}$.

	$[CH_3COOH]$	$[CH_3COO^-]$	$[H_3O^+]$	$\frac{[CH_3COO^-] \cdot [H_3O^+]}{[CH_3COOH]}$
Solution A	$9,9 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-3}$	$1,7 \times 10^{-5}$
Solution B	$9,6 \times 10^{-3}$	$4,0 \times 10^{-4}$	$4,0 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-5}$

b. On obtient les mêmes résultats dans la dernière colonne.

9. Les réactions ne sont donc pas toujours totales. Il faut maintenant prendre en compte l'avancement final x_f au lieu de x_{\max} comme valeur finale de l'avancement.

10. L'expérience réalisée illustre que la constante d'acidité ne dépend pas des quantités initiales de réactifs. L'expression de cette constante se déduit de l'équation de la réaction : on trouve au dénominateur les concentrations finales des produits et au numérateur celle des réactifs (sauf celle de l'eau).

ACTIVITÉ 3

L'aspirine arrive en retard

p. 328

1. a. Une réaction peut se produire entre l'acide AH et les ions hydroxyde, car on met en présence l'acide d'un couple et la base d'un autre couple. Son équation chimique est $AH(aq) + HO^-(aq) \rightleftharpoons A^-(aq) + H_2O(l)$.

b. L'espèce chimique la plus soluble est A^- .
 c. Le pH des sucs gastriques est inférieur à la valeur du pK_a du couple AH/A^- : c'est donc la forme AH qui prédomine dans l'estomac.

2. a. On remarque que les comprimés d'aspirine pH 8 ne sont pas attaqués par l'acide chlorhydrique qui a un pH voisin de celui de l'estomac : ces comprimés sont donc résistants aux sucs gastriques, ils sont gastrorésistants.

b. Les cachets doivent être avalés, sans les croquer, sinon on casse alors l'enrobage des comprimés et ils ne sont plus gastrorésistants : ils ne passeront pas l'estomac indemnes.

c. Le pH de l'intestin est supérieur à la valeur du pK_a du couple AH/A^- : c'est donc la forme A^- qui prédomine dans l'intestin. La dissolution sera aisée car la forme A^- conduit à une solution homogène.

3. L'enrobage permet donc à l'aspirine de passer l'estomac et d'atteindre l'intestin où elle pourra se dissoudre facilement et passer dans le sang.

ACTIVITÉ 4

Détermination du pK_a d'un couple

p. 329

1. a. Il est possible de partir du mélange précédent en ajoutant par exemple au premier mélange un volume $V = 5,0$ mL de solution d'ions éthanoate pour obtenir le second mélange.

b. Voir tableau question 3.a.

2. a. La concentration en acide vaut donc dans le mélange : $[AH] = \frac{c \cdot V_{AH}}{V_{AH} + V_{A^-}}$.

b. De même, la concentration en base conjuguée vaut :

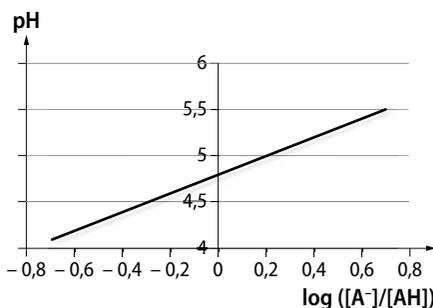
$$[A^-] = \frac{c \cdot V_{A^-}}{V_{AH} + V_{A^-}}$$

c. En effectuant le rapport, on montre bien l'égalité demandée : $\frac{[A^-]}{[AH]} = \frac{V_{A^-}}{V_{AH}}$.

3. a.

V_{AH} (mL)	25	25	25	25	20	10	5,0
V_{A^-} (mL)	5,0	10	20	25	25	25	25
$\frac{V_{A^-}}{V_{AH}}$	0,20	0,40	0,80	1,0	1,3	2,5	5,0
$\log \frac{V_{A^-}}{V_{AH}}$	-0,70	-0,40	-0,10	0	0,10	0,40	0,70
pH du mélange	4,1	4,4	4,7	4,8	4,9	5,2	5,5

b. La courbe obtenue est :



4. La courbe obtenue est une droite de nature affine.

L'équation de cette courbe est $pH = 4,8 + \log \frac{[A^-]}{[AH]}$.

Le coefficient de régression R^2 doit être proche de 1,0 si les mesures sont de bonne qualité.

5. On obtient $pH = pK_a$ pour $\log \frac{V_{A^-}}{V_{AH}} = 0$.

6. Le pK_a du couple acide éthanoïque/ion éthanoate vaut 4,8.

7. La valeur du pK_a correspond à l'ordonnée à l'origine dans l'équation de la courbe modélisée.

8. La moyenne des valeurs obtenues par les différents groupes doit être proche de 4,8.

9. Lorsque le pH est inférieur au pK_a du couple, la forme acide est à une concentration plus grande que la forme basique.

10. a. En lisant la valeur du pH pour laquelle $V_{AH} = V_{A^-}$, on obtient directement la valeur du pK_a du couple NH_4^+/NH_3 soit 9,2.

b. L'acide éthanoïque réagit plus avec l'eau que l'ion ammonium puisque, pour les mêmes quantités ajoutées, le pH est plus faible avec l'acide éthanoïque : la réaction qui forme les ions oxonium s'est davantage produite.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : Définir le pH d'une solution aqueuse

1. 1. Vrai

2. Vrai.

3. Vrai, pour la majorité des pH-mètres.

2. 1. b.

2. b.

3. Y a-t-il une erreur ?

Un élève mesure le pH d'une solution avec du papier pH. Pour cela, il découpe un morceau de papier pH et le plonge dans la solution à tester. Il compare la couleur obtenue avec celle de l'échelle de teinte.

Le protocole suivi par l'élève est-il correct ?

L'élève ne doit pas tremper le papier pH dans le flacon mais il doit utiliser un agitateur en verre propre, qu'il trempe dans le flacon. Il dépose une goutte de la solution à tester sur le papier pH et compare la couleur obtenue avec l'échelle de teinte.

- 5** 1. On utilise la formule $\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+]$. On calcule :
- vinaigre : $\text{pH} = 3,1$;
 - eau pure : $\text{pH} = 7,0$;
 - eau de Javel : $\text{pH} = 11,5$.

2. Le vinaigre a un pH inférieur à 7,0, il s'agit donc d'une solution acide ; l'eau pure est neutre et l'eau de Javel est une solution aqueuse basique.

6 Maxime commet une erreur : le volume d'eau contenu dans l'aquarium est grand. En ajoutant de l'acide chlorhydrique, le pH va diminuer mais n'atteindra pas directement 2.

Mathilde a raison concernant la basicité de l'eau de Javel, mais celle-ci va tuer tous les organismes aquatiques, y compris les poissons !

7 1. D'après la couleur observée :

- avec l'hélianthine, le pH est supérieur à 4,4 ;
- avec le BBT, le pH est inférieur à 6,0 ;
- avec la phénolphthaléine, le pH est inférieur à 8,2.

2. a. Un encadrement de la valeur du pH de la solution A est donc [4,4 ; 6,0].

b. L'intervalle de concentrations en ions oxonium de cette solution serait donc $[1,0 \times 10^{-6} ; 4,0 \times 10^{-5}]$ en $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

3. a. Cette méthode n'est utilisable qu'avec les solutions incolores.

b. Cette méthode est plus longue qu'avec un pH-mètre, elle est moins précise et ne fonctionne pas avec des solutions colorées. Elle est cependant moins coûteuse.

8 1. Cette solution est acide.

2. a. Le pH de la solution est compris entre 3,3 et 3,5.

b. La précision relative du pH-mètre pour ce pH mesuré vaut $\Delta\text{pH}/\text{pH} = 0,1/3,4 = 3\%$.

3. a. L'intervalle dans lequel se trouve la concentration en ions oxonium de cette solution est donc, en $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$: $[3,2 \times 10^{-4} ; 5,0 \times 10^{-4}]$.

b. À partir de la valeur de pH mesurée, on trouve :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-3,4} = 4,0 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

La précision de la mesure de la concentration en ions oxonium de cette solution est :

$$\frac{\Delta[\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{H}_3\text{O}^+]} = (5,0 - 3,2)/(2 \times 4,0) = 22\%.$$

Un faible écart sur la mesure du pH induit donc un grand écart sur la détermination de la concentration en ions oxonium.

COMPÉTENCE 2 : Connaître la notion d'équilibre acido-basique

9 a. $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{CH}_3\text{COO}^-$.

b. $\text{HNO}_3/\text{NO}_3^-$.

c. $\text{HNO}_2/\text{NO}_2^-$.

d. $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$.

10 Les couples acide-base sont : $\text{H}_3\text{O}^+/\text{H}_2\text{O}$, $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$, $\text{HCOOH}/\text{HCOO}^-$, $\text{HSO}_4^-/\text{SO}_4^{2-}$.

11 1. $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-4,5} = 3,2 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

2. $K_e = [\text{H}_3\text{O}^+] \cdot [\text{HO}^-]$. D'où :

$$[\text{HO}^-] = K_e/[\text{H}_3\text{O}^+] = 1,0 \times 10^{-14}/(3,2 \times 10^{-5})$$

$$[\text{HO}^-] = 3,2 \times 10^{-10} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

3. Lorsqu'on dilue la solution, la concentration en ions oxonium diminue et celle des ions hydroxyde augmente.

12 Les concentrations sont indiquées en $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

	pH	$[\text{H}_3\text{O}^+]$	$[\text{HO}^-]$
Solution 1	2,6	$2,5 \times 10^{-3}$	$4,0 \times 10^{-12}$
Solution 2	4,3	$5,2 \times 10^{-5}$	$1,9 \times 10^{-10}$
Solution 3	10,9	$1,3 \times 10^{-11}$	$7,8 \times 10^{-4}$

13 1. Le pH d'une solution d'acide méthanoïque est inférieur à 7 car cette solution contient une espèce chimique acide.

2. a. Un acide faible est une espèce susceptible de réagir sur l'eau en libérant des protons, mais selon une réaction qui n'est pas totale.

b. La base conjuguée de l'acide méthanoïque est l'ion méthanoate HCOO^- .

3. L'équation de la réaction se produisant entre l'acide méthanoïque et l'eau est :



15 1. L'équation de la réaction est :



2. a. On construit un tableau d'avancement, qui fournit directement l'expression de $x_{\text{max}} = c \cdot V = 5,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$. La quantité maximale d'ions oxonium pouvant être formée vaut x_{max} .

État	x	AH + H ₂ O ⇌ A ⁻ + H ₃ O ⁺		A ⁻	H ₃ O ⁺
initial	0	c · V	solvant	0	0
en cours	x	c · V - x	solvant	x	x
final	$x_{\text{max}} = c \cdot V$	$c \cdot V - x_{\text{max}}$	solvant	x_{max}	x_{max}

b. La concentration finale en ions oxonium vaut $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}} = 1,6 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. La quantité d'ions oxonium formés est obtenue en multipliant la concentration précédente par le volume V :

$$n(\text{H}_3\text{O}^+)_f = [\text{H}_3\text{O}^+] \cdot V = 10^{-2,8} \times 0,200 = 3,2 \times 10^{-4} \text{ mol}.$$

c. La quantité d'ions oxonium formés est inférieure à la quantité maximale pouvant être libérée : la réaction entre l'acide ascorbique et l'eau n'est pas totale donc l'acide ascorbique est un acide faible.

COMPÉTENCE 3 : Identifier l'espèce prédominante d'un couple acide-base en solution

16 1. Faux. La constante d'acidité est caractéristique du couple considéré, à température donnée.

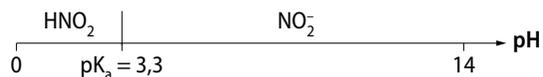
2. Faux. La forme basique d'un couple acide-base prédomine lorsque le pH de la solution est supérieur à la valeur du pK_a du couple.

3. Vrai.

17 1. a. L'équation de la réaction entre l'acide nitreux et l'eau : $\text{HNO}_2(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{NO}_2^-(\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$.

b. L'équation de la réaction entre l'ion méthanoate et l'eau : $\text{HCOO}^-(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{HCOOH}(\text{aq}) + \text{HO}^-(\text{aq})$.

2. a. Les diagrammes de prédominance sont :



b. Le pH de la solution d'acide nitreux est inférieur au pK_a du couple, c'est donc l'acide conjugué HNO_2 qui prédomine ; le pH de la solution d'ion méthanoate est supérieur au pK_a du couple, c'est donc la base conjuguée HCOO^- qui prédomine.

19 1. La forme prédominante est l'ion nitrite car le pH de la solution est supérieur au pK_a du couple.

2. Le pH de la solution est lié à la valeur du rapport $\frac{[\text{NO}_2^-]}{[\text{HNO}_2]}$

ainsi qu'au pK_a du couple : $\text{pH} = \text{p}K_a + \log \frac{[\text{NO}_2^-]}{[\text{HNO}_2]}$.

Ainsi, $\log \frac{[\text{NO}_2^-]}{[\text{HNO}_2]} = \text{pH} - \text{p}K_a$ soit :

$$\frac{[\text{NO}_2^-]}{[\text{HNO}_2]} = 10^{(\text{pH} - \text{p}K_a)} = 10^{(7,7 - 3,3)} = 2,5 \times 10^4.$$

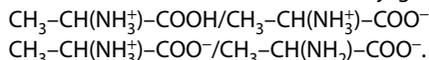
Les ions nitrite prédominent vraiment.

3. Les ions nitrite ont donc une concentration réelle égale à la concentration en soluté apportée $c = 0,018 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et la concentration réelle en acide nitreux est déterminée grâce au rapport calculé précédemment $\frac{[\text{NO}_2^-]}{[\text{HNO}_2]} = 2,5 \times 10^4$.

Ainsi, $[\text{HNO}_2] = \frac{[\text{NO}_2^-]}{2,5 \times 10^4} = 7,2 \times 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

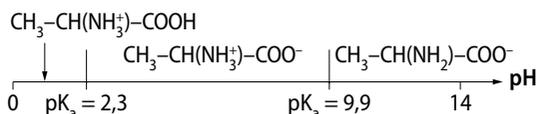
20 1. $-\text{NH}_2$ est un groupe amine et $-\text{COOH}$ est un groupe carboxyle. Le groupe carboxyle a des propriétés acides en solution et le groupe amine a des propriétés basiques.

2. On constitue les deux couples acide/base auxquels appartiennent ces espèces en sachant qu'il y a une différence d'un H^+ entre l'acide et la base conjuguée :



3. Le premier couple comporte la forme acide et la forme basique du groupe carboxyle, sa valeur est $\text{p}K_{a1} = 2,3$. Le second couple comporte la forme acide et la forme basique du groupe amine, sa valeur est $\text{p}K_{a2} = 9,9$.

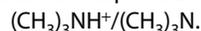
4. Le diagramme de prédominance est donc :



21 1. Cette amine a des propriétés basiques en solution car le pH de la solution est supérieur à 7,0.

2. La formule de l'espèce conjuguée de cette amine est l'ion triméthylammonium $(\text{CH}_3)_3\text{NH}^+$.

Le couple acide-base correspondant est :



3. $(\text{CH}_3)_3\text{N}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons (\text{CH}_3)_3\text{NH}^+(\text{aq}) + \text{HO}^-(\text{aq})$.

4. Le pH est supérieur à la valeur du pK_a : c'est donc la forme basique, la triméthylamine, qui prédomine en solution.

5. La constante d'acidité de ce couple s'écrit :

$$K_a = \frac{[(\text{CH}_3)_3\text{N}] \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]}{[(\text{CH}_3)_3\text{NH}^+]}$$

Ainsi $\frac{[(\text{CH}_3)_3\text{N}]}{[(\text{CH}_3)_3\text{NH}^+]} = \frac{K_a}{[\text{H}_3\text{O}^+]} = \frac{10^{-\text{p}K_a}}{10^{-\text{pH}}} = 10^{-9,8 + 11,5} = 50$.

Ce résultat montre à nouveau la prédominance de la forme basique.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

22 1. et 2. La solution est neutre donc :

$$[\text{HO}^-] = [\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}}$$

Les concentrations sont données en $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

On obtient la troisième colonne du tableau ci-dessous.

Température (°C)	pH	$[\text{HO}^-] = [\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}}$	$K_a = [\text{H}_3\text{O}^+] \cdot [\text{HO}^-]$	$\text{p}K_a = -\log K_a$
0	7,47	$3,39 \times 10^{-8}$	$1,15 \times 10^{-15}$	14,9
25	7,00	$1,00 \times 10^{-7}$	$1,00 \times 10^{-14}$	14,0
37	6,86	$1,38 \times 10^{-7}$	$1,91 \times 10^{-14}$	13,7
50	6,14	$7,24 \times 10^{-7}$	$5,25 \times 10^{-13}$	12,3

3. Le sang a un pH = 7,3 supérieur au pH neutre à 37 °C : il est donc basique.

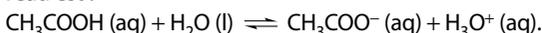
23 1. a. La concentration molaire en ions oxonium H_3O^+ vaut $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-3,0} = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

b. La concentration molaire de l'acide éthanoïque est calculée à partir de la concentration massique :

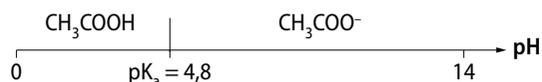
$$c = \frac{C_m}{M} = \frac{0,6}{60} = 1 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

pour que le goût aigre soit perçu.

2. a. L'équation de la réaction de l'acide éthanoïque avec l'eau est :



Le diagramme de prédominance du couple acide éthanoïque/ion éthanoate est :



L'espèce prédominante dans la solution S est donc l'acide éthanoïque car le pH de la solution est inférieur au pK_a du couple.

b. La concentration molaire en ions oxonium H_3O^+ est liée au pH de la solution S :

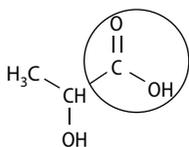
$$[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-3,4} = 4,0 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

L'avancement final de la réaction est :

$$x = n(\text{H}_3\text{O}^+) = [\text{H}_3\text{O}^+] \times V = 2,0 \times 10^{-5} \text{ mol}.$$

c. Si la réaction était totale, l'acide éthanoïque se serait intégralement transformé en ion éthanoate et en ion oxonium. La concentration en ions oxonium serait donc égale à $c = 1 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. La concentration réelle est nettement inférieure à cette valeur : la réaction n'est donc pas totale.

24 1. C'est le groupe carboxyle :



2. a.

État	x	AH + H ₂ O	→	A ⁻ + H ₃ O ⁺
initial	0	c · V	excès	0
en cours	x	c · V - x	excès	x
final	x _f	c · V - x _f	excès	x _f

b. $x_f = n(\text{H}_3\text{O}^+)_f = [\text{H}_3\text{O}^+]_f \cdot V = 10^{-\text{pH}} \times V$
 $x_f = 7,6 \times 10^{-3} \text{ mol}.$

3. a. $K_a = \frac{[\text{A}^-]_f \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]_f}{[\text{AH}]_f}.$

b. On en déduit que $\frac{[\text{A}^-]_f}{[\text{AH}]_f} = \frac{K_a}{[\text{H}_3\text{O}^+]_f} = \frac{K_a}{10^{-\text{pH}}}$ soit :

$$\frac{[\text{A}^-]_f}{[\text{AH}]_f} = \frac{1,3 \times 10^{-4}}{10^{-1,9}} = 1,0 \times 10^{-2}.$$

c. Ce rapport est inférieur à 1 : l'espèce prédominante dans la solution de détartrant est donc l'acide lactique.

25 1. a. Un acide selon Brønsted est une espèce capable de céder un proton.

b. La forme acide du couple AH_2^+/HA est AH_2^+ ; HA est la forme basique de ce couple. La forme acide du couple HA/A⁻ est HA ; A⁻ est la forme basique de ce couple.

2. a. L'équation de la réaction de HA en tant qu'acide avec l'eau est $\text{AH}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{A}^-(\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}).$ C'est le deuxième couple qui intervient ici.

b. L'expression de la constante d'acidité du couple utilisé est $K_{a_2} = \frac{[\text{A}^-]_f \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]_f}{[\text{AH}]_f}.$

Or $K_{a_2} = 10^{-\text{pK}_{a_2}} = 10^{-7} = 1,0 \times 10^{-7}.$

c. D'après l'expression précédente, l'expression littérale du rapport est $\frac{[\text{A}^-]_f}{[\text{AH}]_f} = \frac{K_{a_2}}{[\text{H}_3\text{O}^+]_f}.$ Sa valeur est :

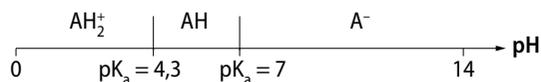
$$\frac{[\text{A}^-]_f}{[\text{AH}]_f} = \frac{K_{a_2}}{[\text{H}_3\text{O}^+]_f} = \frac{10^{-\text{pK}_{a_2}}}{10^{-\text{pH}}} = \frac{1,0 \times 10^{-7}}{1,0 \times 10^{-10}} = 1,0 \times 10^3.$$

d. Ce rapport est très supérieur à 1 : l'espèce prédominante est donc A⁻. La couleur de la solution est bleue.

3. a. L'équation de la réaction de HA en tant que base avec l'eau est $\text{AH}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{AH}_2^+(\text{aq}) + \text{HO}^-(\text{aq}).$ C'est le premier couple qui est mis en jeu.

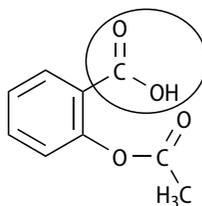
b. La constante d'acidité du couple mis en jeu est $K_{a_1} = \frac{[\text{AH}]_f \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]_f}{[\text{AH}_2^+]_f}.$ Or $K_{a_1} = 10^{-\text{pK}_{a_1}} = 10^{-4,3} = 5,0 \times 10^{-5}.$

4. a. Le diagramme de prédominance des espèces AH_2^+ , AH et A⁻ est :



b. Le sol peut avoir des caractéristiques acide, neutre ou basique selon sa composition ou les apports effectués. Les fleurs d'hortensias peuvent donc avoir des couleurs différentes suivant la nature du sol puisque les différentes espèces conjuguées ont des couleurs variées.

26 1. Le groupe carboxyle est entouré ci-dessous :



2. a. Pour obtenir une solution limpide, il faut filtrer la solution saturée.

b. Pour calculer la concentration molaire maximale, on part de la solubilité donnée dans l'énoncé en concentration massique et on la divise par la masse molaire de l'aspirine : $c = \frac{3,3}{180} = 1,8 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

3. On utilise la valeur du $\text{p}K_a$ du couple pour tracer le diagramme de prédominance :



4. a. Le pH de l'estomac est inférieur au $\text{p}K_a$ du couple : la forme prédominante est donc AH.

b. On trouve le rapport $\frac{[A^-]}{[AH]}$ grâce à l'expression de la constante d'acidité : $K_a = \frac{[A^-] \cdot [H_3O^+]}{[AH]}$.

Le rapport $\frac{[A^-]}{[AH]} = \frac{K_a}{[H_3O^+]} = \frac{K_a}{10^{-\text{pH}}} = 1,6 \times 10^3$. L'espèce conjuguée prédominante est donc la forme basique.

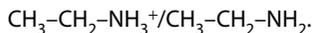
27 1. Ce gaz comprimé est :

- inflammable, il faut le maintenir à l'écart de toute flamme ou point chaud ;
- irritant pour les yeux et les voies respiratoires, il faut donc porter un masque, des lunettes de protection et il faut réaliser la manipulation sous la hotte.

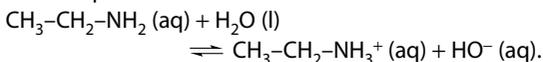
2. La quantité de matière de gaz est obtenue en divisant le volume de gaz par le volume occupé par une mole de gaz : $n = \frac{V_{\text{gaz}}}{V} = \frac{3,6}{24,4} = 0,15 \text{ mol}$. La concentration en amine vaut $c = \frac{n}{V} = \frac{0,15}{0,300} = 0,49 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

3. Une base selon Brönsted est une espèce chimique capable de capter un proton.

4. La formule développée de l'acide conjugué de l'éthanimine est donc $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-NH}_3^+$ et le couple auquel appartient l'éthanimine est :



5. a. L'équation de la réaction est :



b. Le tableau d'avancement associé à cette réaction est :

État	x	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-NH}_2(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l})$	\rightleftharpoons	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-NH}_3^+(\text{aq}) + \text{HO}^-(\text{aq})$
initial	0	$c \cdot V$	Solvant	0
en cours	x	$c \cdot V - x$	Solvant	x
final	x_{max}	$c \cdot V - x_{\text{max}}$	Solvant	x_{max}

Ainsi $x_{\text{max}} = c \cdot V = 0,49 \times 0,300 = 0,15 \text{ mol}$.

6. a. La concentration en ions hydroxyde :

$$[\text{HO}^-] = \frac{K_e}{[\text{H}_3\text{O}^+]} = \frac{K_e}{10^{-\text{pH}}} = \frac{1,0 \times 10^{-14}}{10^{-12,2}} = 1,6 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

et quantité de matière $n_{\text{HO}^-} = [\text{HO}^-] \cdot V = 4,8 \times 10^{-3} \text{ mol}$.

b. Cette quantité est inférieure à l'avancement maximal, donc la réaction n'est pas totale.

c. Les quantités de matière sont obtenues à partir du tableau d'avancement, puisque :

$$x = n(\text{HO}^-) = 4,8 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

ainsi $n(\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-NH}_3^+) = x = 4,8 \times 10^{-3} \text{ mol}$

et $n(\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-NH}_2) = c \cdot V - x = 0,15 \text{ mol}$.

Les concentrations molaires sont calculées en divisant les quantités de matière précédentes par le volume de la solution : $[\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-NH}_3^+] = 1,6 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

et $[\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-NH}_2] = 0,48 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

d. La constante d'acidité du couple est :

$$K_a = \frac{[\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-NH}_2] \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-NH}_3^+]} = \frac{0,48 \times 10^{-12,2}}{1,6 \times 10^{-2}} = 1,9 \times 10^{-11}$$

et le $\text{p}K_a$ du couple acide/base de l'amine vaut :

$$\text{p}K_a = -\log K_a = 10,7$$

28 1. a. L'équation de la réaction de l'acide A_1H avec l'eau est $\text{A}_1\text{H}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{A}_1^-(\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$.

b. Le tableau d'avancement associé à cette réaction est :

État	x	$\text{A}_1\text{H}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l})$	\rightleftharpoons	$\text{A}_1^-(\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$
initial	0	$c \cdot V$	Solvant	0
en cours	x	$c \cdot V - x$	Solvant	x
final	x_f	$c \cdot V - x_f$	Solvant	x_f

c. L'avancement maximal x_{max} vaut $c \cdot V = 1,5 \times 10^{-4} \text{ mol}$.

d. La quantité d'ions oxonium formés réellement est donnée par :

$$n(\text{H}_3\text{O}^+) = [\text{H}_3\text{O}^+] \cdot V = 10^{-\text{pH}} \times V = 10^{-2,9} \times 0,100 = 1,3 \times 10^{-4} \text{ mol}$$

e. La quantité d'ions oxonium formés réellement est inférieure à l'avancement maximal x_{max} de cette réaction, donc cette réaction n'est pas totale.

f. $\tau_1 = \frac{x_f}{x_{\text{max}}} = 84 \%$. La réaction n'est pas totale, mais

elle est fortement avancée.

2. a. L'équation de la réaction de l'acide A_2H avec l'eau est $\text{A}_2\text{H}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{A}_2^-(\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$.

b. En procédant de la même manière, on trouve $\tau_2 = 0,11 = 11 \%$.

3. a. Les acides A_1H et A_2H ne réagissent pas totalement avec l'eau puisque l'avancement est inférieur à 1.

b. L'acide citrique A_1H réagit le plus avec l'eau pour une même concentration.

c. Entre deux acides, celui qui réagit le plus avec l'eau pour une concentration donnée est celui dont le $\text{p}K_a$ du couple acide-base a la plus faible valeur et une constante d'acidité K_a la plus forte.

4. La solution d'acide citrique va le plus acidifier les crus-dités. C'est le conservateur le plus approprié à la maison car on dispose facilement de citron.

5. a. Le pH d'une solution aqueuse dont la concentration en ions oxonium serait :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = c = 1,5 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

vaudrait $\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+] = 2,8$.

b. Ce pH est proche de celui de la solution S_1 d'acide citrique : la réaction avec l'eau est fortement avancée, ce n'est pas évident de dire qu'il s'agit d'un acide faible car la différence de pH est très limitée. Par contre, cette différence est plus nette pour la solution S_2 , donc l'acide A_2H est faible dans l'eau.

EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

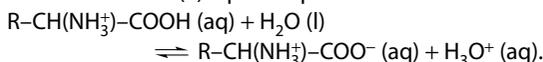
29 1. a. Ce composé se trouve en solution aqueuse car la molécule comporte un groupe acide carboxylique de nature acide, qui va céder un proton au groupe amine ayant une nature basique.

b. La formule de la base conjuguée de ce composé est $\text{R}-\text{CHNH}_2-\text{COO}^-$ car $-\text{NH}_3^+$ constitue une forme acide conjuguée.

c. La formule de l'acide conjugué est $\text{R}-\text{CHNH}_3^+-\text{COOH}$ car $-\text{COO}^-$ constitue une forme basique conjuguée.

d. On peut donc constituer deux couples acide-base.

2. a. La réaction (1) a pour équation :



b. La constante d'acidité K_{a_1} associée à cette réaction

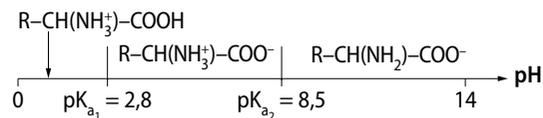
$$\text{est } K_{a_1} = \frac{[\text{R}-\text{CH}(\text{NH}_3^+)-\text{COO}^-] \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{R}-\text{CH}(\text{NH}_3^+)-\text{COOH}]}.$$

3. a. La réaction (2) est $\text{R}-\text{CH}(\text{NH}_3^+)-\text{COO}^-(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{R}-\text{CH}(\text{NH}_2)-\text{COO}^-(\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}).$

b. La constante d'acidité K_{a_2} associée à cette réaction

$$\text{est } K_{a_2} = \frac{[\text{RCH}(\text{NH}_2)-\text{COO}^-] \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{RCH}(\text{NH}_3^+)-\text{COO}^-]}.$$

4. Si l'on considère une eau ayant un pH neutre ou modérément acide ou basique, c'est-à-dire ayant un pH voisin de 7 à une ou deux unités près, alors on se trouve au-dessus de $\text{p}K_{a_1}$ et en dessous de $\text{p}K_{a_2}$. C'est donc l'amphion qui prédomine.



5. Pour que l'ion ne se déplace plus, il faut que la charge positive compense exactement la charge négative : on retrouvera ceci pour un certain pH appelé point isoélectrique.

Réactions acido-basiques

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
<ul style="list-style-type: none"> – Réactions quasi totales en faveur des produits : <ul style="list-style-type: none"> • acide fort, base forte dans l'eau ; • mélange d'un acide fort et d'une base forte dans l'eau. – Réaction entre un acide fort et une base forte : aspect thermique de la transformation. Sécurité. – Contrôle du pH : solution tampon ; rôle en milieu biologique. 	<ul style="list-style-type: none"> – Calculer le pH d'une solution aqueuse d'acide fort ou de base forte de concentration usuelle. – <i>Mettre en évidence l'influence des quantités de matière mises en jeu sur l'élévation de température observée.</i> – Extraire et exploiter des informations pour montrer l'importance du contrôle du pH dans un milieu biologique.

Les compétences à acquérir dans la séquence

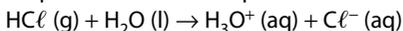
1. Calculer le pH d'une solution aqueuse d'acide fort ou de base forte.
2. Connaître quelques aspects des réactions entre acides forts et bases fortes.
3. Extraire et exploiter des informations sur l'importance du contrôle du pH.

Évaluation diagnostique

p. 342

SITUATION 1

Cette situation permet de vérifier que l'élève sait que la réaction d'un acide sur l'eau produit des ions oxonium et que celle d'une base produit des ions hydroxyde :



Elle permet également d'insister sur ce que sont l'acide chlorhydrique et la soude, solutions rencontrées couramment en exercices et travaux pratiques.

L'**activité 1** introduit la notion d'acides forts et de bases fortes, pour lesquels la réaction sur l'eau est totale : l'équation de la réaction s'écrit donc avec une simple flèche.

SITUATION 2

La boîte autochauffante illustre une application très pragmatique de l'intérêt que peuvent avoir les réactions étudiées dans ce chapitre. Les élèves doivent mentionner le caractère exothermique de la réaction qui se produit entre la chaux vive et l'eau, et une discussion peut également s'engager sur l'aspect technique de l'inven-

tion (nécessité de séparer les réactifs, comment déclencher la réaction, etc.).

L'**activité 3** propose une étude quantitative du caractère exothermique d'une réaction entre un acide fort et une base forte.

SITUATION 3

L'exemple des pluies acides permet d'illustrer l'importance du contrôle du pH et d'amener les élèves à s'interroger sur l'existence d'autres milieux pour lesquels une variation de pH peut avoir des conséquences dramatiques. Le sang est un exemple parmi d'autres.

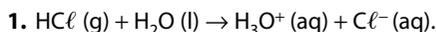
L'**activité 4** étudie les processus mis en jeu dans le contrôle du pH sanguin, tandis que l'**activité 2** met en évidence les propriétés des solutions tampon.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

Acides forts, bases fortes

p. 344



2. a.
$$n(\text{H}_3\text{O}^+) = n(\text{HCl}) = \frac{V_{\text{HCl}}}{V_m} = \frac{250 \times 10^{-3}}{24} = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol.}$$

b. $\text{pH}_{\text{théorique}} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+] = -\log (1,0 \times 10^{-2}) = 2,0.$
On constate que le pH théorique a la même valeur que le pH mesuré de la solution.

c. La concentration effective des ions oxonium dans la solution préparée correspond donc à celle calculée en supposant la transformation totale : la supposition est donc correcte et la réaction entre le chlorure d'hydrogène et l'eau est une réaction totale.

Remarque : HCl n'est pas l'acide chlorhydrique : l'acide chlorhydrique est la solution aqueuse de chlorure d'hydrogène HCl et elle ne contient d'ailleurs aucune molécule de HCl mais seulement des ions H_3O^+ (aq) et HO^- (aq).

d. Toutes les molécules de HCl s'étant dissociées, HCl est qualifié d'acide fort (et par extension on dit que l'acide chlorhydrique est un acide fort).

3. Il suffit pour chaque valeur de c_a de calculer le pH théorique par la relation donnée et de comparer cette valeur à celle du pH réellement mesuré :

c_a (mol·L ⁻¹)	1,0	$1,0 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-4}$
pH (réel)	0,2	1,1	2	3	4
pH (théorique)	0	1	2	3	4
c_a (mol·L ⁻¹)	$1,0 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-9}$
pH (réel)	5	6	6,8	7	7
pH (théorique)	5	6	7	8	9

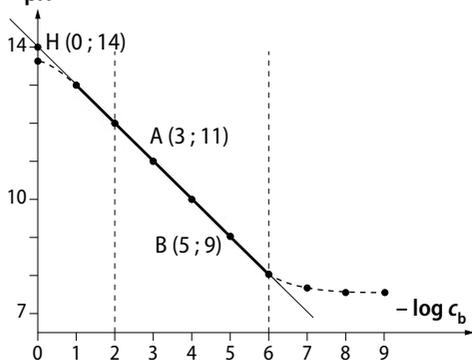
On constate que les valeurs des pH mesurées et théoriques coïncident pour les concentrations telles que :

$$1,0 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \leq c_a \leq 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

Conclusion : la relation $\text{pH} = -\log c_a$, permettant de calculer le pH d'une solution d'acide fort à la concentration c_a (en mol · L⁻¹), n'est valide que si :

$$1,0 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \leq c_a \leq 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

4. pH



5. a. On constate que sur l'intervalle $2 < -\log c_b < 6$, les points de coordonnées $(-\log c_b ; \text{pH})$ sont alignés : la représentation de $\text{pH} = f(-\log c_b)$ peut être modélisée par une fonction affine sur cet intervalle.

b. Il existe donc une relation mathématique de la forme $\text{pH} = m(-\log c_b) + p$ où m est le coefficient directeur de la droite et p son ordonnée à l'origine.

Graphiquement, l'ordonnée à l'origine est le point H, donc $p = 14$.

Le coefficient directeur :

$$m = \frac{\text{pH}_A - \text{pH}_B}{(-\log c_b)_A - (-\log c_b)_B} = \frac{11 - 9}{3 - 5} = -1.$$

Donc on a la relation :

$$\text{pH} = 14 - 1 \times (-\log c_b) = 14 + \log c_b.$$

6. Une base forte est une base qui se dissocie totalement dans l'eau : sa réaction avec l'eau est totale.

7.

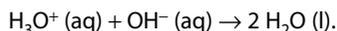
	Solution d'acide fort de concentration c_a	Solution de base forte de concentration c_b
Calcul du pH	$\text{pH} = -\log c_a$	$\text{pH} = 14 + \log c_b$
Domaine de validité	$1,0 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \leq c_a$ (ou c_b) $\leq 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	
Influence de la dilution par 10 sur la valeur du pH	Le pH augmente d'une unité.	Le pH diminue d'une unité.

ACTIVITÉ 2

Mélanges d'acides et de bases

p. 345

1. $[\text{H}_3\text{O}^+ \text{ (aq)} + \text{Cl}^- \text{ (aq)}] + [\text{OH}^- \text{ (aq)} + \text{Na}^+ \text{ (aq)}] \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O (l)} + \text{Cl}^- \text{ (aq)} + \text{Na}^+ \text{ (aq)}$
qui s'écrira, en ne tenant pas compte des ions spectateurs :



2. a. Avant introduction de la soude :

$$\text{pH}_i = 2 \text{ donc } [\text{H}_3\text{O}^+]_i = 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$\text{et } n_i(\text{H}_3\text{O}^+) = [\text{H}_3\text{O}^+]_i \cdot V_1 = 10^{-2} \times V_1$$

$$= 10^{-2} \times 20 \times 10^{-3} = 2,0 \times 10^{-4} \text{ mol}.$$

b. Après introduction de la soude, $\text{pH}_f = 7$ donc :

$$n_f(\text{H}_3\text{O}^+) = [\text{H}_3\text{O}^+]_f \cdot (V_1 + V_2) = 10^{-7} \times (V_1 + V_2)$$

$$= 10^{-7} \times 40 \times 10^{-3} = 4,0 \times 10^{-9} \text{ mol}.$$

3. $n_{\text{consommés}}(\text{H}_3\text{O}^+) = n_i(\text{H}_3\text{O}^+) - n_f(\text{H}_3\text{O}^+) \approx 2,0 \times 10^{-4} \text{ mol}.$

4. $n_i(\text{OH}^-) = c_b \cdot V_2 = 2,0 \times 10^{-4} \text{ mol}$: cette quantité est égale à la quantité d'ions oxonium consommés.

5. L'équation de la réaction entre l'acide chlorhydrique et la soude montre qu'elle se produit mole à mole : elle consomme simultanément la même quantité de matière en acide et en base. Tous les oxoniums sont consommés : la réaction avec la soude est donc totale.

6. Le pH de la solution A diminue, ce qui est cohérent puisqu'on « acidifie » de l'eau « pure ».

Le pH de la solution B augmente puisqu'on « basifie » de l'eau pure. L'introduction de l'acide dans la solution de $\text{pH} = 7$ apporte des ions oxonium supplémentaires, donc $[\text{H}_3\text{O}^+] > 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et donc pH inférieur à 7. L'introduction de base dans la solution de $\text{pH} = 7$ apporte des ions hydroxyde supplémentaires, donc $[\text{OH}^-] > 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et donc $[\text{H}_3\text{O}^+] < 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ d'où un pH supérieur à 7.

7. Le couple $\text{CH}_3\text{COOH (aq)} / \text{CH}_3\text{COO}^- \text{ (aq)}$ intervient deux fois.

8. a. La constante d'acidité du couple est :

$$K_a = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+]_f \cdot [\text{CH}_3\text{COO}^-]_f}{[\text{CH}_3\text{COOH}]_f}$$

b. On mesure $\text{pH}_f = 4,8$. On calcule alors le rapport :

$$\frac{[\text{CH}_3\text{COO}^-]_f}{[\text{CH}_3\text{COOH}]_f} = \frac{K_a}{[\text{H}_3\text{O}^+]} = \frac{K_a}{10^{-\text{pH}_f}} = 0,99 \approx 1,$$

donc $[\text{CH}_3\text{COOH}]_f \approx [\text{CH}_3\text{COO}^-]_f$.

9. a. Après ajout d'acide ou de base dans le mélange, on constate que son pH ne varie pas, contrairement à ce qu'on pouvait penser, comme lors de l'expérience 1.

b. On peut expliquer cette observation en remarquant par exemple que les ions oxonium réagissent avec les ions éthanoate pour former l'acide éthanoïque, mais ce dernier réagit à son tour avec les ions éthanoate de sorte que le rapport de leur concentration reste quasiment constant, d'où un pH constant.

10. a. Dans une solution tampon, la concentration de la forme acide et celle de sa base conjuguée sont identiques : $[\text{AH}]_f = [\text{A}^-]_f$.

b. Cette solution s'oppose aux variations de pH que peuvent provoquer l'ajout modéré d'acide ou de base (tampon = amortisseur).

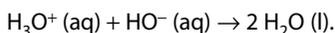
c. La réaction est totale.

ACTIVITÉ 3

Aspects thermiques d'une réaction acido-basique

p. 346

1. $[\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{Cl}^-(\text{aq}) + [\text{HO}^-(\text{aq}) + \text{Na}^+(\text{aq})] \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \text{Cl}^-(\text{aq}) + \text{Na}^+(\text{aq})$
qui s'écrit, en ne tenant pas compte des ions spectateurs :



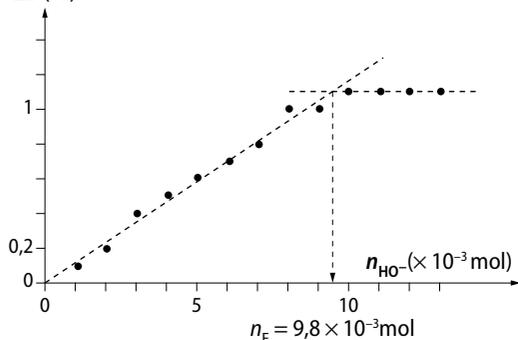
2. a. La température du système augmente.

b. La réaction libère de l'énergie : on dit qu'elle est exothermique.

3. a. $n(\text{HO}^-) = c \cdot V_T$.

b. $\Delta T = T - T_i$ où T est la valeur de la température après ajout du volume total et T_i la valeur initiale de la température (pas d'ajout).

4. ΔT (°C)



5. a. On lit une valeur de $n_E \approx 9,5 \times 10^{-3} \text{ mol}$ (valeur très proche de $1,0 \times 10^{-2} \text{ mol}$).

b. Tant que $n < n_E$, l'élévation de température montre que la réaction entre les ions hydroxyde et les ions oxonium se produit et libère de l'énergie.

c. À partir de $n > n_E$, la température n'évolue quasiment plus : il n'y a plus de réaction entre les ions hydroxyde et oxonium, ces derniers ont donc été totalement consommés.

6. Si la transformation est totale, un tableau d'évolution montre que :

	H_3O^+	+	$\text{HO}^-(\text{aq})$	\rightarrow	$2 \text{H}_2\text{O}(\text{l})$
État initial	$c_A \cdot V_A$		n_E		excès
État final	$c_A \cdot V_A - x_f$		$n_E - x_f$		excès

Lorsque les ions oxonium sont tous consommés, $n_f(\text{H}_3\text{O}^+) = c_A \cdot V_A - x_f = 0$ d'où un avancement :

$$x_f = c_A \cdot V_A = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol}.$$

La quantité de matière minimale n_E d'ions hydroxyde à utiliser est donc donnée par la relation :

$$n_E - x_f = 0, \text{ soit } n_E = x_f = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol}.$$

On voit que cette valeur correspond à celle trouvée expérimentalement à partir du graphe : la réaction acido-basique étudiée est donc totale.

7. a. $m_{\text{solution}} = (V_A + V_B + V_{\text{eau}}) \cdot \rho = 109,5 \text{ g}$;
 $\Delta T = 1,1 \text{ }^\circ\text{C} = 1,1 \text{ K}$.

Donc $Q = 4,18 \times 109,5 \times 1,1 = 5,0 \times 10^2 \text{ J}$.

b. L'énergie libérée par la réaction d'une mole d'ions hydroxyde est donc :

$$Q' = \frac{Q}{n_E} = 52\,998 \text{ J} \approx 53 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}.$$

c. On retrouve à peu près la valeur de l'énergie molaire de réaction tabulée. L'écart s'explique par :

- les limites de précision du thermomètre ;
- les pertes d'énergie du système.

8. L'élévation de température semble proportionnelle à la quantité de matière de réactifs mis en jeu : cette élévation de température est liée à la réaction qui se produit et à la quantité de matière mise en jeu. L'énergie libérée par la réaction est elle aussi proportionnelle à la quantité de matière des réactifs mis en jeu.

ACTIVITÉ 4

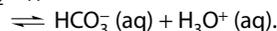
Le corps humain, une machine à réguler le pH

p. 347

1. a. $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}} = 3,9 \times 10^{-8} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

b. La mort est provoquée par une augmentation de l'acidité du sang car « une baisse de 0,5 unité du pH provoque la mort ».

2. a. $\text{CO}_2(\text{aq}), \text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l})$



b. $K_{a1} = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+]_f \cdot [\text{HCO}_3^-]_f}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_f}$

c. La relation précédente peut se mettre sous la forme :

$$\text{pH} = \text{p}K_{a_1} + \log \frac{[\text{HCO}_3^-]_f}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_f}$$

En tenant compte des valeurs données dans le texte :

$$\text{pH} = 6,1 + \log \frac{2,7 \times 10^{-2}}{1,36 \times 10^{-3}} = 7,4$$

qui est bien le pH du sang.

3. a. $\text{H}_2\text{PO}_4^- (\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} (\text{l}) \rightleftharpoons \text{HPO}_4^{2-} (\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq})$.

b. $K_{a_2} = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+]_f \cdot [\text{HPO}_4^{2-}]_f}{[\text{H}_2\text{PO}_4^-]_f}$.

c. $[\text{HPO}_4^{2-}]_f = 4 [\text{H}_2\text{PO}_4^-]_f$

$\text{pH} = \text{p}K_{a_2} + \log \frac{[\text{HPO}_4^{2-}]_f}{[\text{H}_2\text{PO}_4^-]_f} = 6,8 + \log 4 = 7,4$ qui est bien la valeur du pH du sang.

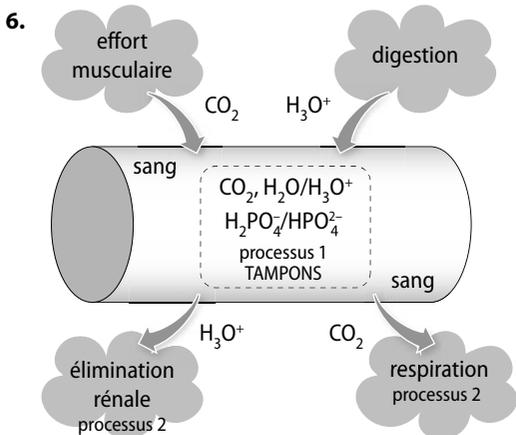
4. a. Lorsqu'il y a accumulation d'ions oxonium dans le sang, d'après :

$\text{CO}_2 (\text{aq}), \text{H}_2\text{O} (\text{l}) + \text{H}_2\text{O} (\text{l}) \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- (\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq})$, les ions oxonium réagissent sur HCO_3^- pour former du CO_2 et le pH augmente.

b. Lorsqu'il y a accumulation de dioxyde de carbone dans le sang, celui-ci réagit avec l'eau d'après :

$\text{CO}_2 (\text{aq}), \text{H}_2\text{O} (\text{l}) + \text{H}_2\text{O} (\text{l}) \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- (\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq})$ et il y a production d'ions oxonium : le pH diminue.

5. Dans le cas de production de dioxyde de carbone, la respiration (expiration) permet de faire diminuer sa quantité. Dans le cas de production d'ions oxonium, la régulation se fait par les reins qui permettent son élimination. Dans les deux cas, les tampons chimiques interviennent.



EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : Calculer le pH d'une solution aqueuse d'acide fort ou de base forte

1. Vrai.

2. Faux. Il est négatif ou nul.

3. Vrai.

4. Faux. Il est supérieur ou égal.

5. Faux. Il est donné par $\text{pH} = \text{p}K_e + \log c$.

2 Pour les solutions a et d, on a $\text{pH} = -\log c$: elles contiennent un acide fort.

Aucune ne contient une base forte pour laquelle on a $\text{pH} = 14 + \log c$.

3

$c_0 (\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	$[\text{H}_3\text{O}^+] (\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	$[\text{HO}^-] (\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	pH
$1,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-10}$	$1,0 \times 10^{-4}$	10
$6,3 \times 10^{-4}$	$6,3 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-11}$	3,2
$5,0 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-12}$	$5,0 \times 10^{-3}$	11,7
$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-12}$	2
$1,6 \times 10^{-2}$	$6,3 \times 10^{-13}$	$1,6 \times 10^{-2}$	12,2

4 1. Un acide est fort si sa réaction sur l'eau est quasi-totale.

2. $\text{HNO}_3 (\text{l}) + \text{H}_2\text{O} (\text{l}) \rightleftharpoons \text{NO}_3^- (\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq})$.

3. $\text{pH} = -\log c = 3$.

6 1. $\text{HCl} (\text{g}) + \text{H}_2\text{O} (\text{l}) \rightarrow \text{Cl}^- (\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq})$.

2. L'acide chlorhydrique.

3. a. $n = 2,0/24 = 8,3 \times 10^{-2} \text{ mol}$.

b. $c = n/V_{\text{solution}} = 8,3 \times 10^{-2}/5,0 = 1,7 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

4. $\text{pH} = -\log c = 1,8$.

7 La potasse caustique

L'hydroxyde de potassium est un composé de formule KOH, son nom commun est potasse caustique. Dans le passé, il était fabriqué par lixiviation des cendres du bois puis évaporation de la solution obtenue dans des pots en fer, laissant un résidu blanc appelé « cendres de pot ». Avec l'hydroxyde de sodium, ce solide blanc est une base forte typique. Il a de nombreuses applications industrielles.

1. Quelle est la principale propriété de la potasse caustique ? C'est une base forte.

2. Définir une base forte.

Sa réaction avec l'eau est quasi totale.

3. La concentration molaire d'une solution d'hydroxyde de potassium est $0,02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Quel est son pH ?

$\text{pH} = 14 + \log 0,02 = 12,3$.

COMPÉTENCE 2 : Connaître quelques aspects des réactions entre acides forts et bases fortes

8 1. a et c.

2. c.

3. b.

9 1. Faux. Il faut porter des lunettes, mais éviter les lentilles de contact.

2. Faux. Il faut effectuer le mélange lentement.

3. Vrai.

4. Vrai.

10 1. Quand on manipule l'acide sulfurique il faut toujours porter des lunettes de protection, une blouse et des gants.

2. Il faut verser l'acide sulfurique concentré dans l'eau. La dissolution de l'acide sulfurique dans l'eau est très exothermique. Si l'on versait l'eau sur l'acide, on risquerait des projections d'acide.

3. On ne doit surtout pas chauffer, mais au contraire refroidir la solution lorsqu'on fait la dilution.

4. Dans un erlenmeyer, mettre environ 100 mL d'eau. Plonger l'erlenmeyer dans un bain d'eau glacée. Rajouter alors, après avoir chaussé des lunettes de protection, 1 mL d'acide sulfurique concentré. Agiter. Lorsque la solution est bien refroidie, la verser dans une fiole de 1 L. Compléter avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge, boucher et agiter correctement avant utilisation.

11 1. On les appelle respectivement solution aqueuse d'hydroxyde de sodium et solution aqueuse de chlorure d'hydrogène.

2. $\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{HO}^-(\text{aq}) \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}(\text{l})$.

3. a. $n(\text{HO}^-) = 0,2 \times 0,5 = 0,1 \text{ mol}$ et

$n(\text{H}_3\text{O}^+) = 0,1 \times 1,0 = 0,1 \text{ mol}$.

b. On se trouve dans les proportions stœchiométriques.

4. C'est une solution de chlorure de sodium, de pH égal à 7.

12 1. a. C'est une réaction exothermique.

b. $\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{HO}^-(\text{aq}) \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}(\text{l})$.

2. $n = 28,5/57 = 0,5 \text{ mol}$.

3. $Q = 1,5 \times 57 = 86 \text{ kJ}$.

4. Pour effectuer le mélange d'un acide fort et d'une base forte :

– ne pas tenir à la main le récipient dans lequel le mélange est effectué car il peut devenir très chaud, mais toujours le poser sur une table ;

– s'assurer que le matériau du récipient résiste aux variations brutales de température ;

– effectuer le mélange lentement, en agitant continuellement ;

– porter une blouse, des gants et des lunettes de protection.

13 1. On peut dire que l'acide sulfurique a une action relativement superficielle, alors que la soude agit en profondeur.

2. Le pictogramme signifie qu'il ne faut pas laisser le flacon à la portée des enfants.

3. Il faut porter une blouse en coton et se munir de lunettes et de gants.

4. Il y a une phrase de risque « provoque de graves brûlures » et quatre phrases de conseils de prudence : « Conserver sous clé et hors de portée des enfants », « En cas de contact avec les yeux, laver immédiatement et abondamment avec de l'eau et consulter un spécialiste », « Ne jamais verser d'eau dans ce produit » et « En cas d'accident ou de malaise, consulter immédiatement un médecin (si possible lui montrer l'étiquette) ».

5. Rincer abondamment à l'eau courante pendant 15 minutes au moins.

6. L'emballage doit être doté d'une fermeture de protection pour les enfants.

7. Il doit porter une indication de danger décelable au toucher.

COMPÉTENCE 3 : Extraire et exploiter des informations sur l'importance du contrôle du pH

14 1. b.

2. a et c.

3. a.

16 1. $\text{pH} = \text{pK}_a + \log \left(\frac{[\text{CH}_3\text{COO}^-]_f}{[\text{CH}_3\text{COOH}]_f} \right)$
 $= \text{pK}_a = 4,8$.

2. C'est une solution tampon car elle renferme un acide faible AH et sa base conjuguée A⁻ en quantités égales.

3. $n = m/M = 0,4/40 = 1 \times 10^{-2} \text{ mol}$ et

$[\text{HO}^-] = n/V = 1 \times 10^{-2}/1 = 1 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

d'où $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-12} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et $\text{pH} = 12$.

17 1. Il faut rester à pH constant car toute modification du pH extracellulaire peut entraîner la mort des cellules animales.

2. Il est donc nécessaire d'utiliser des systèmes tampon dans les milieux de culture.

3. L'HEPES convient car son pK_a est proche du pH optimal de culture.

4. pH inférieur à 6,8 ; il y a risque de blocage métabolique.

18 1. Le pH d'une solution tampon ne varie pas lors d'une dilution.

2. De nombreux milieux biologiques, dont le sang, ont des pH compris entre 6 et 8.

3. Si $\text{pH} = \text{pK}_a$, on a $[\text{H}_2\text{PO}_4^-]_f = [\text{HPO}_4^{2-}]_f$.

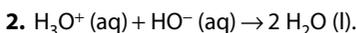
On mélange 0,5 L de solution de KH_2PO_4 à 0,1 mol/L et 0,5 L de solution de K_2HPO_4 à 0,1 mol · L⁻¹ ; dans le mélange, les concentrations de chaque ion seront égales à 0,05 mol · L⁻¹.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

19

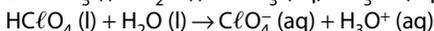
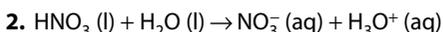
Espèce chimique	pK _a du couple associé	Acide fort ou base forte
HNO ₃	-2	Acide fort
Ion éthanolate CH ₃ CH ₂ O ⁻	16	Base forte
H ₃ O ⁺	0	Acide fort
HO ⁻	14	Base forte

20 1. Il y a un échauffement de la solution.



3. On se trouve dans les proportions stœchiométriques : la solution finale est une solution de chlorure de sodium de pH = 7. La concentration en ions oxonium est $[\text{H}_3\text{O}^+]_f = 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

21 1. Un acide fort donne une réaction quasi totale avec l'eau.



3. Il faut toujours porter des lunettes de protection, une blouse et des gants.

4. $\text{pH}_1 = -\log [\text{H}_3\text{O}^+]_f = -\log (n/V) = -\log (5,0 \times 10^{-3} / 0,100)$
 $= -\log (5,0 \times 10^{-2}) = 1,3$.

$\text{pH}_2 = -\log c = -\log 3 \times 10^{-2} = 1,5$: l'acide perchlorique a le pH le plus haut.

22 1. Sa réaction avec l'eau est quasi totale.

2. L'hydroxyde de sodium.

3. $\text{pH} = 14 + \log c = 14 + \log 2 \times 10^{-2} = 12,3$.

4. Si on dilue 100 fois une base forte, le pH diminue de 2 unités : la base est une base forte.

23 1. $Q = m_{\text{solution}} \cdot c_{\text{eau}} \cdot \Delta T = 250 \times 4,18 \times 2,7$
 $= 2,8 \times 10^3 \text{ J}$.

2. $n = c \cdot V = 0,25 \times 0,2 = 5,0 \times 10^{-2} \text{ mol}$.

$Q' = Q/n = 56 \text{ kJ}$.

3. L'écart observé peut s'expliquer par les simplifications faites (solutions assimilées à de l'eau et capacité calorifique du calorimètre négligé) et les fuites thermiques.

24 1. $\text{pH} = \text{pK}_a + \log \left(\frac{[(\text{CH}_3)_2\text{AsO}_2^-]_f}{[(\text{CH}_3)_2\text{AsO}_2\text{H}]_f} \right)$
 $\text{pH} = 6,2 + \log (2,4 \times 10^{-2} / (2,0 \times 10^{-2})) = 6,3$.

Le pH est proche du pK_a.

2. C'est une solution tampon : elle modère les variations de pH lors de la libération d'acide ou de base par les réactions biologiques.

3. Dans 1,0 L de solution :

$$n(\text{As}) = n((\text{CH}_3)_2\text{AsO}_2^-) + n((\text{CH}_3)_2\text{AsO}_2\text{H})$$

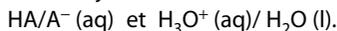
$$= 2,4 \times 10^{-2} + 2,0 \times 10^{-2} = 4,4 \times 10^{-2} \text{ mol}$$

D'où $m(\text{As}) = n \cdot M(\text{As}) = 4,4 \times 10^{-2} \times 75 = 3,3 \text{ g}$.

25 1. Un acide selon Brønsted est une espèce chimique capable de céder un proton H⁺.



Les couples mis en jeu sont :



3. D'après l'équation chimique, on a :

$$n(\text{H}_3\text{O}^+) = n(\text{A}^-)$$

4. a. $n(\text{H}_3\text{O}^+) = [\text{H}_3\text{O}^+] \cdot V$.

$n(\text{H}_3\text{O}^+)_1 = 1,3 \times 10^{-3} \times 0,200 = 2,6 \times 10^{-4} \text{ mol}$.

$n(\text{H}_3\text{O}^+)_2 = 1,0 \times 10^{-2} \times 0,200 = 2,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$.

b. $n(\text{HA})_0 = c_0 \cdot V$

$n(\text{HA})_0 = n(\text{HA}_2)_0 = 1,0 \times 10^{-2} \times 0,200 = 2,0 \times 10^{-3} \text{ mol}$.

c. HA₁ est un acide faible et HA₂ un acide fort car il est totalement dissocié dans l'eau.

26 1. $m(\text{HNO}_3) = 1,26/2 = 0,63 \text{ g}$.

$c_0 = m/(M \cdot V) = 0,63/63 \times 1 = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

2. C'est un acide fort, donc $[\text{H}_3\text{O}^+] = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

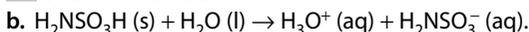
3. $\text{pH} = -\log c_0 = 2$.

4. a. $V_{\text{mère}} = 1,0 \times 10^{-3} \times 0,2/1,0 \times 10^{-2} = 0,020 \text{ L} = 20 \text{ mL}$.

b. Utiliser une pipette jaugée de 20 mL surmontée d'une propipette pour prélever les 20 mL de solution-mère, les verser dans la fiole jaugée de 200 mL et compléter avec de l'eau distillée (cf. Fiche pratique 14, page 591).

5. $\text{pH} = -\log c_1 = -\log 1,0 \times 10^{-3} = 3$.

27 1. a. C'est un acide fort.

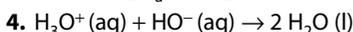


2. D'après l'équation, les quantités de matière d'acide H₂NSO₃H introduit et d'ions oxonium H₃O⁺(aq) formés sont égales, d'où $n(\text{H}_3\text{O}^+) = m/M(\text{H}_2\text{NSO}_3\text{H})$.

3. a. $n(\text{H}_3\text{O}^+) = 3,8/97 = 3,9 \times 10^{-2} \text{ mol}$.

D'où $c_a = n(\text{H}_3\text{O}^+)/V = 3,9 \times 10^{-2} / 0,5 = 7,8 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

b. $\text{pH} = -\log c_a = -\log (7,8 \times 10^{-2}) = 1,1$.



5. a. On observe une augmentation de la température.

b. Ne pas tenir à la main le récipient dans lequel le mélange est effectué, mais toujours le poser sur une table ; s'assurer que le matériau du récipient résiste aux variations brutales de température ; effectuer le mélange lentement, en agitant continuellement.

6. $n_a = c_a \cdot V_1 = 7,8 \times 10^{-2} \times 20 \times 10^{-3} = 1,6 \times 10^{-3} \text{ mol}$.

$n_b = c_b \cdot V_2 = 0,10 \times 15,6 \times 10^{-3} = 1,6 \times 10^{-3} \text{ mol}$.

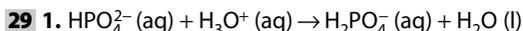
7. La solution est neutre.

28 1. 3 et 3,5 : acide ; 7 : neutre ; 11 : basique.

2. Solution d'acide chlorhydrique : pH = 3 ; solution de soude : pH = 11 ; solution d'acide méthanoïque : pH = 3,5 (car c'est un acide faible) ; eau salée : pH = 7.

3. Pour un acide fort, $\text{pH} = -\log c$ donc $c = 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

4. a. Une solution tampon.
 b. Le pH d'une solution tampon est proche du pK_a du couple acide-base, donc $pK_a = 3,8$.
 5. Le pH va peu varier.



2. $[\text{HPO}_4^{2-}]_f = 0,28 - 0,05 = 0,23 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

$[\text{H}_2\text{PO}_4^-]_f = 0,17 + 0,05 = 0,22 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

3. a. $\text{pH} = pK_a + \log \left(\frac{[\text{HPO}_4^{2-}]_f}{[\text{H}_2\text{PO}_4^-]_f} \right)$
 $= 7,2 + \log 0,23/0,22 = 7,2$.

b. Dans l'eau pure, on aurait $\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+]_f = 1,3$.

4. La variation de pH qui vaut $7,4 - 7,2 = 0,2$ est faible.

30 1. a. $\text{pH} = pK_a + \log \left(\frac{[\text{HCO}_3^-]_f}{[\text{CO}_2(\text{aq}), \text{H}_2\text{O}(\text{l})]_f} \right)$.

b. $\text{pH} = 6,1 + \log \frac{24}{1,2} = 7,4$.

2. a. En système fermé, la concentration de HCO_3^- devient donc $24 - 2 = 22 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ et la concentration en CO_2 : $1,2 + 2 = 3,3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$.

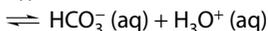
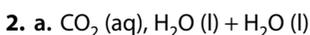
b. Le pH vaut donc $\text{pH} = 6,1 + \log 22/3,2 = 6,9$.

3. a. Elle est plus faible.

b. En système ouvert : $\text{pH} = 6,1 + \log 22/1,2 = 7,4$.

4. En système ouvert, le tampon bicarbonate du sang est nettement plus efficace qu'en système fermé.

31 1. C'est un milieu tampon.



$K_a = \frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}} \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}}}$

b. $pK_a = -\log K_a = -\log \frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}} \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}}}$

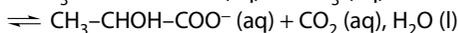
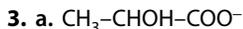
$pK_a = -\log \frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}}}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}}} - \log [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}$

$pK_a = -\log \frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}}}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}}} + \text{pH}$

$\text{pH} = pK_a + \log \frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}}}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}}}$

c. $\log \frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}}}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}}} = \text{pH} - pK_a$

$\frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}}}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}}} = 10^{\text{pH} - pK_a} = 10^{7,4 - 6,1} = 10^{1,3} = 20$.



(réaction 3)

4. a. Il y a formation de CO_2 d'après la réaction précédente.

b. Si $[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]$ augmente, alors le rapport $\frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}}}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}}}$ diminue.

On a établi que $\text{pH} = pK_a + \log \frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}}}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}}}$ diminue.

Donc le pH doit diminuer.

c. C'est bien ce qu'indique le texte : « diminution locale du pH sanguin du fait de la création en abondance de dioxyde de carbone dissous dans le sang ».

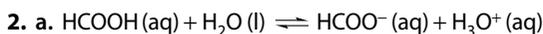
5. a. $\text{pH} = 6,1 + \log \frac{2,4 \times 10^{-2}}{4,4 \times 10^{-3}}$.

$\text{pH} = 6,8$ après effort.

b. Avant effort $\text{pH} = 7,4$: on vérifie bien que le pH a diminué.

EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

32 1. $\text{pH} = -\log c = -\log 1,0 \times 10^{-2} = 2$.



b. $K_a = \frac{([\text{HCOO}^-]_f \times [\text{H}_3\text{O}^+]_f)}{[\text{HCOOH}]_f}$

c. $\text{pH} = pK_a + \log \left(\frac{[\text{HCOO}^-]_f}{[\text{HCOOH}]_f} \right)$, soit :

$[\text{HCOO}^-]_f / [\text{HCOOH}]_f = 10^{\text{pH} - pK_a} = 10^{3,5 - 3,7} = 0,63$.

3. a. $[\text{HCO}_2^-]_f + [\text{HCO}_2\text{H}]_f = \frac{m}{(M_{\text{HCO}_2\text{Na}} \cdot V)}$
 $= \frac{m}{M_{\text{HCO}_2\text{Na}}} = \frac{m}{68}$.

b. $\frac{[\text{HCO}_2^-]_f + [\text{HCO}_2^-]_f}{0,63} = \frac{m}{68}$.

$[\text{HCO}_2^-]_f = \frac{m}{1,8 \times 10^2}$.

4. a. $[\text{HCO}_2^-]_f + [\text{Cl}^-]_f = [\text{H}_3\text{O}^+]_f + [\text{Na}^+]_f$ (à $\text{pH} = 3,5$, les ions HO^- sont négligeables).

b. $\frac{m}{1,8 \times 10^2} + 1,0 \times 10^{-2} = 10^{-3,5} + \frac{m}{68}$

$m = 1,1 \text{ g}$.

1. Les molécules **b**, **d** et **e** sont des composés organiques contenant de l'azote : elles contribuent à l'azote Kjeldahl.

2. **d** $C_9H_{20}N_4O_2$ et **e** $C_6H_{13}NO_2$.

3. Il s'agit d'un atome de carbone asymétrique.

4. a. L'acide sulfurique est un acide fort car le pK_a du couple auquel il appartient est négatif d'après les données.

b. Lorsqu'on ajoute l'acide sulfurique, acide fort, dans l'échantillon analysé, il faut porter une blouse, des gants et des lunettes de protection. De plus, le récipient contenant l'échantillon ne doit pas être tenu à la main.

5. $NH_4^+(aq) + HO^-(aq) \rightarrow NH_3(aq) + H_2O(l)$.

6. L'acide sulfurique ayant été introduit en excès, il en reste dans l'échantillon. On réalise donc le mélange d'un acide fort et d'une base forte à des concentrations élevées : cette réaction est exothermique et pourrait conduire à des projections.

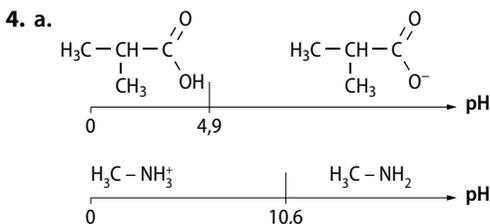
7. $[NH_3] = 4,7 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot L^{-1}$, soit :
 $80 \text{ mg} \cdot L^{-1} > 15 \text{ mg} \cdot L^{-1}$.

Cette eau dépasse la valeur du seuil de rejet.

2 1. **a** contient le groupe caractéristique des amines ; c'est la méthanimine.

2. **b** contient le groupe caractéristique des acides carboxyliques ; c'est l'acide 2-méthylpropanoïque.

3. Aucun atome de carbone présent dans **b** ne porte quatre groupes ou atomes différents : **b** ne contient pas d'atome de carbone asymétrique.



b. À pH 2, l'échantillon contient $H_3C-CH(CH_3)-COOH$ et $H_3C-NH_3^+$. Cette dernière espèce, chargée positivement, est retenue par la résine. Au bas de la colonne, on récupère l'espèce neutre $H_3C-CH(CH_3)-COOH$.

3 A. 1. On reconnaît le groupe d'atomes caractéristique des esters.

2. Pour que le carbone désigné par la flèche rouge soit asymétrique, il faut qu'il porte quatre atomes ou groupes différents, donc que R_1 et R_3 soient différents.

3. a. L'acide stéarique comporte 18 atomes de carbone et a pour formule brute $C_{18}H_{36}O_2$.

b. Il s'agit de la représentation topologique.

B. 1. $RCOOH + HO^-(aq) \rightarrow RCOO^-(aq) + H_2O(l)$.

2. a. En s'aidant éventuellement de l'exemple de l'acide stéarique vu en **A.3.a**, on détermine que la formule générale demandée est : **b** $C_nH_{2n}O_2$.

b. $M_{acide} = 12 \times n + 2n \times 1 + 2 \times 16 = 14n + 32$.

3. D'après l'équation écrite en **B.1.**, 1 mole de potasse peut réagir avec 1 mol d'acide, donc $n_{KOH} = n_{acide}$. Donc pour réagir avec 1,0 g d'acide, la masse de potasse nécessaire est :

$$m_{KOH} = n_{KOH} \cdot M_{KOH} = n_{acide} \cdot M_{KOH} = 1,0 / (14n + 32) \times M_{KOH}$$

En exprimant M_{KOH} en $mg \cdot mol^{-1}$, on obtient :

$$IA = 56,1 \times 10^3 / (14n + 32)$$

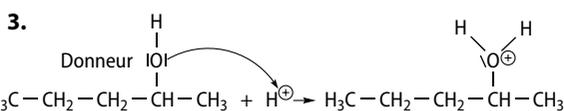
4. Pour l'acide butanoïque, $n = 4$ donc $IA = 638$.

Pour l'acide stéarique, $n = 18$ donc $IA = 198$.

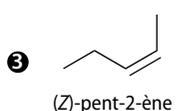
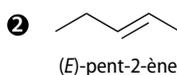
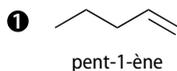
On peut conclure que plus l'acide a une chaîne carbonée longue, plus son indice d'acide est faible.

4 1. L'alcool utilisé est le pentan-2-ol.

2. Cet alcool est chiral puisqu'il contient un seul atome de carbone asymétrique, le C numéro 2.



4. On obtient trois alcènes :



5. Ces trois alcènes sont isomères (même formule brute mais des enchaînements d'atomes différents). **2** et **3** sont diastéréoisomères.

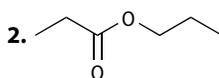
6. La déshydratation est une élimination.

5 1. a. Propan-1-ol : $H_3C-CH_2-CH_2OH$;

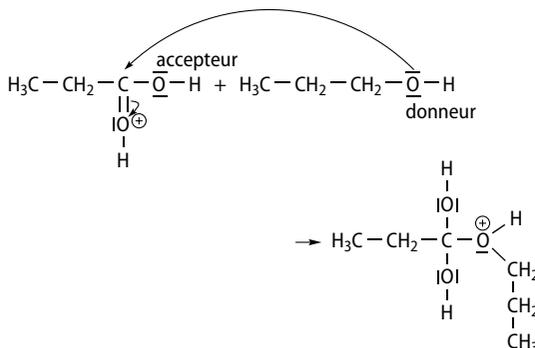
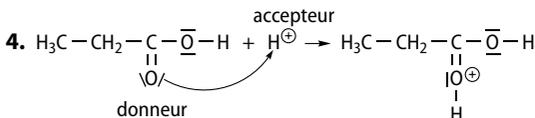
acide propanoïque : H_3C-CH_2-COOH .

b. Le propan-1-ol n'est pas chiral.

c. Le squelette carboné est conservé mais on passe d'un alcool à un acide carboxylique : il n'y a pas modification de chaîne mais il y a une modification de groupe caractéristique.



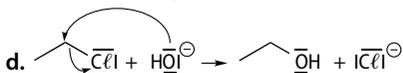
3. a. L'acide sulfurique est un acide fort.
 b. L'utilisation d'acide sulfurique nécessite l'utilisation de gants et lunettes de protection.



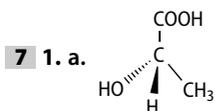
6 1.

	Modifi- cation de chaîne	Modifi- cation de fonction	Addition	Élimi- nation	Substi- tution
1		X			X
2	X	X		X	
3	X	X	X		
4	X	X			

2. a. D'après la table des valeurs d'électronégativité, le chlore est plus électronégatif que le carbone, d'où $\text{C}(\delta^+) - \text{C}(\delta^-)$.
 b. Le site accepteur est localisé sur l'atome de carbone.
 c. Le site donneur de doublet d'électrons est localisé sur l'atome d'oxygène portant trois doublets non liants.



3. a. **B** : butan-2-ol ; **C** : (Z)-but-2-ène.
 b. **B** est chirale (présence d'un seul atome de carbone asymétrique), **C** est achirale.
 c. $\text{H}_3\text{C}-\text{HC}=\text{CH}-\text{CH}_3$.
 4. a. C'est un atome de carbone asymétrique.
 b. Quand il y a un seul atome de carbone asymétrique dans une molécule, alors elle est chirale.
 5. **E** : 3-méthylpent-2-ène ; **F** : butan-2-one ; **G** : éthanal.



- b. L'acide lactique est chiral puisqu'il contient un seul atome de carbone asymétrique.
 c. Cette molécule est énantiomère de celle représentée sur la figure a : elle a donc les mêmes propriétés

vis-à-vis de phénomènes ou réactifs non chiraux (même températures de changements d'état, même solubilité), mais pas forcément même goût par exemple.

2. a. Il s'agit d'un mélange tampon puisque le pH est égal au pK_a du couple.
 b. La formule de l'ion lactate est $\text{CH}_3-\text{CHOH}-\text{COO}^-$.
 c. Puisque $\text{pH} = \text{pK}_a$, on a :

$$[\text{acide lactique}]_f = [\text{ion lactate}]_f$$

et comme le volume est fixé : $n_{\text{acide lactique}} = n_{\text{ions lactate}}$

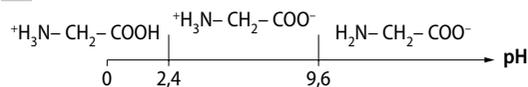
Or $n_{\text{ions lactate}} = 2,4/89 = 2,7 \times 10^{-2} \text{ mol}$

et $n_{\text{acide lactique}} = m_{\text{acide}}/M_{\text{acide}} = d \cdot V_{\text{acide}} \cdot \rho_0/M_{\text{acide}}$

d'où $V = n_{\text{acide lactique}} M_{\text{acide}} / (d \cdot \rho_0)$.

A.N. : $V = 2,7 \times 10^{-2} \times 90 / (1,35 \times 1,0) = 1,8 \text{ mL}$.

8 1.



2. $m = c \cdot V \cdot M = 1,2 \times 0,500 \times 75,0 = 45 \text{ g}$.

3. a. Pour augmenter le pH, il faut ajouter une solution basique, donc on choisit la solution d'hydroxyde de sodium.

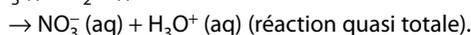
b. À $\text{pH} = 6$, la forme prédominante de la glycine est donnée par le diagramme de prédominance, d'où l'équation :



c. La solution préparée est un mélange d'un acide faible et de sa base conjuguée dans des proportions telles que le pH est proche du pK_a : il s'agit bien d'une solution tampon.

9 1. a. L'acide nitrique est un acide fort puisque, d'après les données, son pK_a est négatif.

b. $\text{HNO}_3 (\text{l}) + \text{H}_2\text{O} (\text{l})$



2. a. 1 L de cette solution a une masse de 1,38 kg dont 0,86 kg d'acide nitrique, d'où une concentration :
 $c = 0,86 \times 10^3 / 63 = 14 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

b. Le volume de solution commerciale à prélever vaut 1,8 mL. Porter des gants et des lunettes de protection. Introduire environ 400 mL d'eau déminéralisée dans une fiole jaugée de 500 mL, y introduire 1,8 mL de la solution commerciale d'acide nitrique en utilisant une pipette graduée et un système de pipetage adapté. Agiter puis compléter jusqu'au trait de jauge.

c. Le pH d'une solution d'acide fort de concentration C se calcule par la formule $\text{pH} = -\log C$ donc ici $\text{pH} = 1,3$.

3. a. Ce n'est pas une réaction acido-basique puisque cette réaction ne consiste pas en un échange de proton entre un acide et une base.

b. $n_{\text{Cu}} = 3/2 n_{\text{NO}} = 0,3 \text{ mol}$, donc $m_{\text{Cu}} = 19 \text{ g}$.

10 1.

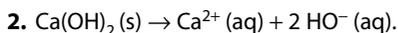
	A	B	C	D	E	F
A	Id	Én	Én	Nonlso	Nonlso	Nonlso
B	Én	Id	Id	Nonlso	Nonlso	Nonlso
C	Én	Id	Id	Nonlso	Nonlso	Nonlso
D	Nonlso	Nonlso	Nonlso	Id	Nonlso	Nonlso
E	Nonlso	Nonlso	Nonlso	Nonlso	Id	Dia
F	Nonlso	Nonlso	Nonlso	Nonlso	Dia	Id

2. A, B et C : groupe hydroxyle et carbonyle ; **D** : groupe carboxyle et hydroxyle ; **E et F** : groupes hydroxyle.

3. D porte une fonction acide carboxylique. D'après les données, c'est un acide faible, donc il tend à faire diminuer le pH de la solution.

4. E porte deux fonctions alcools, qui sont des acides indifférents dans l'eau d'après les données de pK_a , donc le pH ne sera pas modifié.

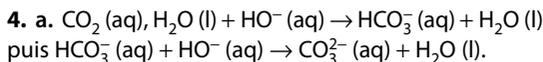
11 1. À partir du calcaire, CaCO_3 , on élimine CO_2 pour passer à la chaux vive, qui a donc pour formule chimique CaO , puis on ajoute H_2O pour passer à la chaux éteinte, CaH_2O_2 ou Ca(OH)_2 . L'expression chaux éteinte peut s'expliquer par le fait qu'elle est obtenue par ajout d'eau sur la chaux vive.



3. Dans l'eau de chaux :

$$[\text{HO}^{-}] = 2 \times 1,6/74,1 \\ = 4,3 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$\text{donc } \text{pH} = 14 + \log[\text{HO}^{-}] \\ = 12,6.$$



b. Le précipité blanc a pour formule $\text{CaCO}_3(\text{s})$.

pK_a du couple acide-base d'un indicateur coloré

1. b.

Bécher	Contenu	Teinte
1	20 mL d'acide chlorhydrique de concentration molaire apportée $c_A = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et 10 gouttes de BBT	jaune
2	20 mL de soude de concentration molaire apportée $c_B = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et 10 gouttes de BBT	bleue
3	20 mL de la solution S et 10 gouttes de BBT	verte

4. b. Le pH de la solution lorsque la teinte sensible est obtenue vaut environ 6,6.

5. a. L'équation de la réaction entre le BBT et l'eau s'écrit :

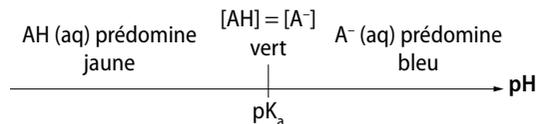


et la constante d'acidité du couple $\text{AH}(\text{aq})/\text{A}^-(\text{aq})$ est :

$$K_a = \frac{[\text{A}^-]_{\text{éq}} \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}}{[\text{AH}]_{\text{éq}}}$$

b. On a la relation $\text{pH} = \text{p}K_a + \log([\text{A}^-]_{\text{éq}}/[\text{AH}]_{\text{éq}})$ et puisqu'à la teinte sensible $[\text{AH}]_{\text{éq}} = [\text{A}^-]_{\text{éq}}$, alors le $\text{p}K_a$ du couple $\text{AH}(\text{aq})/\text{A}^-(\text{aq})$ vaut 6,6.

c. Diagramme de prédominance du couple acide/base de l'indicateur coloré :



Transferts thermiques

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
<p>Du macroscopique au microscopique</p> <ul style="list-style-type: none"> – Constante d'Avogadro. <p>Transferts d'énergie entre systèmes macroscopiques</p> <ul style="list-style-type: none"> – Transferts thermiques : conduction, convection, rayonnement. – Flux thermique. Résistance thermique. – Notion d'irréversibilité. 	<ul style="list-style-type: none"> – Extraire et exploiter des informations sur un dispositif expérimental permettant de visualiser les atomes et les molécules. – Évaluer des ordres de grandeurs relatifs aux domaines microscopique et macroscopique. – Interpréter les transferts thermiques dans la matière à l'échelle microscopique. – Exploiter la relation entre le flux thermique à travers une paroi plane et l'écart de température entre ses deux faces.

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Interpréter les transferts thermiques.
2. Savoir faire un lien entre macroscopique et microscopique.
3. Exploiter la relation $\Phi = \Delta T/R$.

Évaluation diagnostique

p. 366

SITUATION 1

Dans cette situation, il s'agit de faire comprendre à l'élève que les matériaux se comportent différemment vis-à-vis du transfert de chaleur. Il est question ici de comparer la conduction de la chaleur par un objet en bois et un objet en métal. Le métal est bien meilleur conducteur de chaleur et c'est pour cela que la cuillère en métal chauffe, intégralement, plus rapidement que la cuillère en bois.

La notion de conduction thermique est davantage développée dans les **activités 1 et 4**.

SITUATION 2

L'objectif est de mettre l'accent sur une représentation fautive que peuvent avoir les élèves, en raison du vocabulaire utilisé dans la vie courante. On dit qu'un pull en laine est « chaud » mais il ne produit pas de chaleur. De ce fait, un pull en laine, même s'il nous permet d'avoir chaud en hiver, ne se contente que de limiter le transfert de l'énergie thermique que nous dégageons. Le fait d'envelopper un glaçon dans un pull en laine

n'accéléra pas sa fonte, bien au contraire puisqu'il sera alors davantage isolé de l'extérieur. Il mettra donc plus de temps à fondre que si on l'avait laissé à l'air libre, à température ambiante.

Cette situation permet d'introduire la notion de transfert thermique qui sera reprise et développée dans l'**activité 2**.

SITUATION 3

La technique de microscopie en champ proche est complètement différente de celle de la microscopie optique. Les images obtenues ne représentent pas vraiment la réalité : les couleurs sont ajoutées pour accentuer le relief, par exemple. Ainsi, une telle image nous donne des informations sur la disposition des atomes uniquement : ce que l'on perçoit correspond aux contours du nuage électronique des atomes. L'**activité 3** permettra de présenter l'intérêt et les techniques de la microscopie à champs proche et de distinguer celle-ci de la microscopie optique.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

Sensation de température

p. 368

1. a. On classe les objets ainsi : polystyrène, bloc en bois, eau dans la bassine et tube en cuivre.
- b. Toute la classe s'accorde à dire la même chose (à peu près), donc on peut penser dans un premier temps que le classement effectué est fiable et que l'expérience est probante.

- 2. a.** Les deux corps semblent avoir la même température ou tout du moins, la différence entre les deux est moins évidente qu'à la première expérience.
- b.** La température de la main est différente : elle est maintenant à une température plus basse (à peu près égale à celle des matériaux, en réalité).
- 3. a.** Lorsqu'ils sont chauffés à la même température, le cuivre paraît plus « chaud » que le polystyrène. On observait l'inverse dans le classement de la question 1.
- b.** La température des mains est maintenant inférieure à celle des objets touchés.
- 4. a.** L'eau dans la bassine est chaude pour la main droite et froide pour la main gauche.
- b.** On en conclut que la sensation de chaud et de froid est relative : elle est liée à la température de la main. Ce n'est donc pas une mesure fiable de température.
- 5. a.** Lorsque le transfert thermique se fait de l'objet vers la main, on ressent l'objet comme « chaud ». Lorsque le transfert se fait dans l'autre sens, on a l'impression que l'objet est « froid ».
- b.** Dans le cas de la question 3. a., le transfert thermique est plus important avec le cuivre qu'avec le polystyrène, c'est pour cela qu'il apparaît plus chaud.
- c.** Dans la question 2. a., le transfert est moins important pour les deux, car la main est froide : elle a moins d'énergie thermique à transmettre.
- 6.** Le cuivre est senti comme le plus froid dans la question 1, et dans la question 3. a., comme le plus chaud, c'est donc lui qui transfère le mieux l'énergie thermique. C'est donc le meilleur conducteur thermique.
- 7. a.** Le sens du toucher ne nous permet donc pas de classer les objets par ordre de température croissante.
- b.** Les objets étaient à la même température à la question 1. a. L'ordre trouvé correspond au classement du meilleur au moins bon conducteur thermique.

ACTIVITÉ 2

La « bouteille thermos »

p. 369

- 1.** Au bout d'un petit moment, la cire se détache : la chaleur de la flamme se répartit sur les clous.
- 2.** Si on refait l'expérience en séparant légèrement les clous, la cire ne se détache pas.
- 3.** Le transfert thermique a été interrompu lorsque les clous n'ont plus été en contact : le transfert thermique par conduction se fait par contact.
- 4.** Le thermomètre indique que la température augmente.
- 5.** La température augmente beaucoup moins cette fois-ci.
- 6.** En l'absence d'air, la température de la feuille augmente un peu plus vite. Le fait d'enlever l'air n'entrave pas le phénomène, bien au contraire.

7. Le transfert par rayonnement se fait même en l'absence d'un milieu matériel. En revanche, une simple feuille métallique (qui réfléchit la lumière) peut isoler de ce transfert.

8. Le thermomètre au-dessus de la résistance montre une température plus importante que celui se trouvant sur le côté.

9. En l'absence d'air (cloche à vide), les deux thermomètres indiquent à peu près la même température.

10. Le transfert thermique par convection nécessite un milieu matériel. Il se fait verticalement vers le haut, grâce à un mouvement de matière.

11. Les deux récipients ne sont pas en contact, limitant ainsi le transfert par conduction. Le vide a été fait entre les deux récipients, empêchant ainsi le transfert par convection. Les parois sont recouvertes de métal afin d'éviter le transfert par rayonnement.

ACTIVITÉ 3

Voir l'infiniment petit

p. 370

1. a. Les longueurs d'ondes des rayonnements visibles s'étendent d'environ 400 nm à 800 nm.

b. Un microscope optique ne pourra donc pas donner des images dont la taille est inférieure à 400 nm, à cause de la diffraction.

2. a. Les microscopes en champ proche, cités dans le texte, sont : le microscope à effet tunnel et le microscope à force atomique.

b. Leur mode de fonctionnement n'a aucun rapport avec les microscopes optiques. Dans les microscopes optiques, on fait converger la lumière issue des objets à observer afin d'en obtenir une image agrandie. Dans les microscopes en champ proche, une pointe est déplacée à proximité de l'objet étudié. La pointe suit la surface et on enregistre son mouvement.

c. Les couleurs ne correspondent pas à la réalité : elles permettent de mettre en évidence le relief de la surface.

3. Les limites de l'œil humain se situent aux alentours de 100 μm. Les microscopes en champ proche permettent de « voir » jusqu'à 0,1 nm. Le rapport des deux est donc $r = (100 \times 10^{-6}) / (0,1 \times 10^{-9}) = 10^6$. Les microscopes en champ proche ont donc une résolution un million de fois supérieure à la résolution de l'œil humain.

4. Ces microscopes ne permettent pas de « voir » au sens propre les atomes. En effet, ils ne permettent pas de capter la lumière issue des objets observés. Ils se contentent de déterminer le profil de la surface des objets observés : l'image obtenue est entièrement synthétisée à partir d'un ordinateur qui interprète les mouvements de la pointe du microscope.

ACTIVITÉ 4

Bien isoler une habitation

p. 371

1. Le voltmètre mesure la tension électrique aux bornes de la résistance chauffante. L'ampèremètre mesure l'intensité du courant électrique qui traverse la résistance chauffante.

2. et 2 bis.

(Mesures effectuées après 45 minutes à forte puissance : $U = 8,1 \text{ V}$, $I = 2,46 \text{ A}$ puis 45 minutes dans les conditions données dans le tableau.)

Matériau de la boîte	Température intérieure (en °C)	Température extérieure (en °C)	Tension électrique (en V)	Courant électrique (en A)
Laine de chanvre épaisse	70,3	24,6	4,90	1,51
Laine de chanvre fine	55,4	25,2	4,90	1,51
Béton	36,4	25,2	4,90	1,51
Laine de chanvre fine avec barre	53,5	40,6	4,90	1,51

3. a. $P = U \cdot I$ avec P en W, U en V et I en A.

b. La puissance électrique est transformée en puissance thermique par une résistance. Ce phénomène se nomme « effet Joule ».

c. La puissance thermique fournie à l'intérieur de la boîte est donc $P_{\text{Th}} = U \cdot I$.

d. Si la température à l'intérieur de la boîte n'augmente plus, c'est que la puissance thermique fournie est égale à la puissance thermique qui sort de la boîte (à travers les parois).

4. a. Le produit $R \cdot \Phi$ est homogène à une température (en K). Or Φ est homogène à une puissance (en W), donc R s'exprime en $\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.

b.

Matériau de la boîte	ΔT (en K)	Φ (en W)	R (en $\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$)
Laine de chanvre épaisse	45,7	7,40	6,18
Laine de chanvre fine	30,2	7,40	4,08
Béton	11,2	7,40	1,51

4 bis a.

Matériau de la boîte	ΔT (en K)	Φ (en W)	R (en $\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$)
Laine de chanvre fine avec barre	12,9	7,40	1,74

b. La barre diminue nettement la résistance thermique de la boîte.

c. Un pont thermique est dû à un changement de matériau dans la structure d'une maison. Il est le lieu d'un

important transfert thermique, diminuant la qualité de l'isolation thermique d'une maison.

5. La laine de chanvre est le meilleur isolant, d'autant plus si elle est mise en épaisseur.

5. bis Pour un matériau donné, deux paramètres sont mis ici en évidence. L'hétérogénéité de la structure fait diminuer la résistance thermique (cas des ponts thermiques). L'épaisseur la fait augmenter.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : Interpréter les transferts thermiques

1. 1. Faux. C'est un phénomène de transfert thermique par conduction.

2. Vrai.

3. Faux. Ceci évite un transfert thermique par rayonnement.

2 1. c.

2. b.

3. c.

3 1. Le transfert thermique de l'eau chauffée à la glace ne peut pas se faire par convection : le liquide chauffé se trouve en haut. Ce transfert se produit lorsque le fluide chauffé monte.

2. L'énergie thermique apportée en haut ne s'est pas transférée au bas du tube : l'eau est un mauvais conducteur thermique.

4 1. La couverture est très fine et en partie constituée d'un métal qui est bon conducteur thermique : elle peut certainement conduire correctement la chaleur.

2. Lorsqu'on l'utilise pour éviter les insulations, le mode de transfert thermique qui est principalement limité est le rayonnement.

3. Les pertes thermiques par rayonnement sont fortement limitées par cette couverture. De plus, en raison de son matériau plastique, elle limite la convection si elle recouvre correctement le corps. Les pertes par conduction thermique, quand à elles, ne sont pas très importantes si la couverture n'est pas posée à même la peau.

5 1. En raison du phénomène de convection, la température est plus importante au-dessus de la flamme qu'à côté d'elle.

2. Le mode de transfert thermique qui ne peut plus avoir lieu en impesanteur est la convection : en effet, elle est due à une différence de densité entre le fluide chauffé et celui qui ne l'est pas. Sans pesanteur, pas de densité, donc pas de convection.

3. Ce mode de transfert permet de créer un courant ascendant qui alimente la flamme de la bougie en air frais, plus riche en dioxygène en éliminant les produits de la combustion. C'est ce qui permet la combustion en continue, tant qu'il y a de la cire dans la bougie.

6 1. a. Il existe trois modes de transferts thermiques : par conduction, par convection et par rayonnement.

b. La plaque vitrocéramique est moins bonne conductrice de chaleur que le métal et bloque le transfert par convection (puisque la résistance est « enfermée »). Ainsi, le transfert thermique se fait essentiellement par rayonnement.

2. a. L'alternance de zone grillée et non grillée est due au contact intermittent de la viande et de la poêle : le transfert thermique se fait par conduction. Celui-ci nécessite un contact pour se produire.

b. Grâce à l'huile, le contact se fait sur toute la surface de la viande. Il peut subsister des nuances du fait que le transfert par conduction dans le métal soit différent du transfert « conducto-convectif » dans l'huile.

COMPÉTENCE 2 : Savoir faire un lien entre microscopique et macroscopique

7 1. c.

2. b.

8 1. *Faux.* On ne peut pas obtenir de photographie d'une molécule avec un microscope optique (et certainement pas de cette apparence). Les seuls microscopes capables d'approcher les dimensions des atomes sont les microscopes en champ proche (à effet tunnel ou à force atomique).

2. *Vrai.*

3. *Faux.* Les images données par les microscopes à effet tunnel ne sont pas en vraies couleurs. Les couleurs sont ajoutées seulement afin d'accentuer la vision du relief de la surface.

9 1. a. Les particules de poussière sont frappées par les molécules d'eau. Lorsqu'on chauffe, l'agitation des molécules d'eau augmente. Ainsi, les poussières subissent plus de chocs.

b. À la surface du métal, des électrons libres se déplacent très vite et les atomes de métal vibrent rapidement, car la température du métal est importante. Les molécules d'eau à proximité sont accélérées lorsqu'elles viennent au contact du métal. L'agitation des molécules d'eau augmente alors.

2. Lorsque l'eau liquide est chauffée, les molécules d'eau s'agitent de plus en plus, s'éloignant alors les unes des autres. La densité de cette eau chaude est plus faible que celle de l'eau froide au-dessus. La portion de liquide chauffé s'élève alors, créant un déplacement de matière.

Le « vide » laissé par cette portion est comblé par de l'eau plus fraîche venant de la surface. Il se crée ainsi des « cellules de convections » qui entraînent les poussières dans leurs mouvements circulaires verticaux.

3. À la question 1. b., c'est le principe de transfert par conduction qui est décrit au niveau microscopique. À la question 2., il s'agit du transfert par convection.

10 1. a. L'énergie moyenne reçue par une molécule est égale à la différence d'énergie de la molécule à 50 °C et à 20 °C, soit :

$$\Delta E = (5/2) \cdot k_B \cdot (T_f - T_i) = 5/2 \times 1,38 \times 10^{-23} \times (50,0 - 20,0). \\ \Delta E = 1,04 \times 10^{-21} \text{ J.}$$

b. La puissance moyenne reçue par une molécule est :

$$P = \Delta E / \Delta t = 1,04 \times 10^{-21} / 600 = 1,73 \times 10^{-24} \text{ W.}$$

2. Si l'enceinte contient 1,5 mol d'air, alors elle contient : $N = 1,50 \times N_A = 1,5 \times 6,022 \times 10^{23} = 9,03 \times 10^{23}$ molécules. La puissance thermique reçue est donc :

$$P_{\text{Th}} = N \cdot P = 9,03 \times 10^{23} \times 1,73 \times 10^{-24} = 1,56 \text{ W.}$$

11 1. Il s'agit d'un transfert thermique par conduction : l'énergie thermique est transmise de proche en proche, sans transfert de matière.

2. a. Puisqu'une mole d'atome de cuivre pèse 63,5 g, alors 1 atome de cuivre pèse :

$$m = 63,5 / N_A = 63,5 / (6,022 \times 10^{23}) = 1,054 5 \times 10^{-22} \text{ g.}$$

L'échantillon contient donc :

$$N = 1,25 \times 10^{-7} / (1,0545 \times 10^{-22}) \\ = 1,19 \times 10^{15} \text{ atomes de cuivre.}$$

Autre méthode. Considérons pour simplifier, que la surface est carrée et fait 1 cm de côté. Sur 1 cm de large, on a $N_{\text{largeur}} = 1,0 \times 10^{-2} / (0,290 \times 10^{-9}) = 3,45 \times 10^7$ atomes par côté. Étant donné que l'épaisseur correspond à une couche d'atomes, il y a donc $N = N_{\text{largeur}}^2 = 1,19 \times 10^{15}$ atomes de cuivre dans la couche.

b. Il faudra un nombre de chocs :

$$n_C = 4,76 \times 10^{-8} / (3,45 \times 10^{-23}) = 1,38 \times 10^{15} \text{ chocs.}$$

c. Chaque atome recevra une énergie :

$$E = 4,76 \times 10^{-8} / (1,19 \times 10^{15}) = 4,00 \times 10^{-23} \text{ J.}$$

COMPÉTENCE 3 : Exploiter la relation $\Phi = \Delta T/R$

12 1. b. Dans la relation, c'est la différence des températures qui compte et non leurs valeurs directes. Plus la résistance est grande, plus le flux est faible.

2. b. R est fixé par le matériau. Si Φ est constant, alors ΔT est constant : les températures de part et d'autre de la paroi évoluent de la même façon.

13 1. *Faux.* Le flux thermique à travers une paroi est la puissance qui traverse cette paroi sous forme de chaleur.

2. *Vrai.*

3. *Vrai.*

4. *Faux*. Si le flux thermique est de 25 W et la résistance thermique de $0,50 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$, alors $\Delta T = 25 \times 0,5 = 12,5 \text{ K}$. Si la température extérieure est de $10 \text{ }^\circ\text{C}$, la température dans le récipient clos sera seulement de $22,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

14 1. Puisque les deux objets sont à la même température et touchent tout deux la main, la valeur de ΔT est la même dans les deux cas.

On a donc $R_{\text{acier}} \cdot \Phi_{\text{acier}} = R_{\text{bois}} \cdot \Phi_{\text{bois}}$. La résistance du bois est 150 fois plus grande que celle de l'acier.

Ainsi, $R_{\text{acier}} \cdot \Phi_{\text{acier}} = 150 \times R_{\text{acier}} \cdot \Phi_{\text{bois}}$, soit :

$$\Phi_{\text{acier}} = 150 \times \Phi_{\text{bois}}. \text{ On a donc } \Phi_{\text{acier}}/\Phi_{\text{bois}} = 150.$$

2. Puisque le flux thermique est plus important pour l'acier que pour le bois, la main reçoit une puissance plus grande dans le cas de l'acier, d'où la sensation de chaleur plus intense.

15 1. On a $\Delta T = R \cdot \Phi$. Puisque Φ est le même pour les vitres et pour la lame d'air, on peut comparer directement les résistances thermiques à partir de ΔT . Ainsi, on voit que pour le verre, ΔT est plus petit. La résistance thermique du verre est donc plus faible que celle de la lame d'air.

2. a. On lit sur le graphique $\Delta T = 15 \text{ K}$. On a donc $R = \Delta T/\Phi = 15/35 = 0,43 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$ par m^2 de surface.

b. Avec une résistance thermique de $0,91 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$ et une puissance de 35,0 W, on a :

$$\Delta T = R \cdot \Phi = 0,91 \times 35,0 = 31,9 \text{ K}.$$

Si la température intérieure est toujours de $20 \text{ }^\circ\text{C}$, la température extérieure sera $T = 20 - 31,9 = -11,9 \text{ }^\circ\text{C}$.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

17 1. À travers un matériau solide, il ne peut y avoir de transfert thermique autre que par conduction thermique.

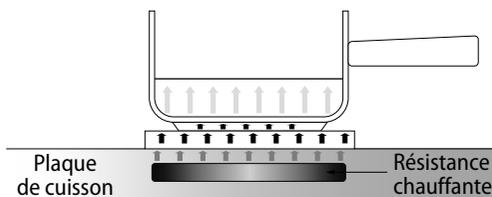
2. On applique la formule :

$$R = \Delta T/\Phi = (1300 - 15)/(40 \times 10^{12}) \\ = 3,2 \times 10^{-11} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}.$$

18 1.

Mode de transfert :

- Transfert thermique par conduction
- Transfert thermique par rayonnement
- Transfert thermique par convection



2. On a $\Delta T = 450 - 100 = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ ou $\Delta T = 350 \text{ K}$ (puisque c'est une différence).

D'où $R = \Delta T/\Phi = 350/750 = 0,47 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$.

3. Le fait de mettre un couvercle accélère la mise en ébullition de l'eau, car cela limite le transfert thermique par convection dans l'air, au-dessus de l'eau, responsable d'une perte importante d'énergie.

19 1. a. Entre le processeur et l'air contenu dans le radiateur, l'énergie se transfère par conduction thermique à travers la pâte thermique et le radiateur en métal.

b. Le transfert thermique par conduction se fait par contact. Il est donc nécessaire entre le processeur et le radiateur.

2. On a, pour l'ensemble {pâte thermique + radiateur}, $\Delta T = 10 \text{ K}$. D'où $R = \Delta T/\Phi = 10/130 = 7,7 \times 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$.

3. a. La convection thermique est un mode de transfert de chaleur qui se fait grâce à un déplacement de matière. La mise en mouvement se fait en raison d'une différence de densité entre le fluide chauffé et le fluide non chauffé. La convection est forcée car ici c'est le ventilateur qui met en mouvement le fluide.

b. Pour absorber 130 W, il faut que l'air absorbe 130 J par seconde. Il faut donc $N = 130/(2,42 \times 10^{-22}) = 5,37 \times 10^{23}$ molécules qui traversent chaque seconde le radiateur, soit $n = 5,37 \times 10^{23}/(6,022 \times 10^{23}) = 0,892 \text{ mol}$ d'air par seconde.

c. Par seconde, on a besoin de $n = 0,892 \text{ mol}$. Or 1 L d'air contient $n_{1L} = 3,77 \times 10^{-2} \text{ mol}$. Le volume d'air nécessaire est donc $V = n/n_{1L} = 0,892/(3,77 \times 10^{-2}) = 23,7 \text{ L}$. Soit un débit $Q = 23,7 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$.

20 1. Le transfert thermique entre la source de chaleur et la base du récipient se fait sans contact. Il ne peut donc pas se faire par conduction thermique.

2. a. Au niveau microscopique, les molécules qui constituent la cire s'agitent de plus en plus et finissent par se séparer : on passe de l'état solide à l'état liquide.

b. Le liquide a une densité légèrement inférieure à celle de la cire solide. Lorsqu'elle passe à l'état liquide, la densité de la cire diminue jusqu'à devenir plus faible que celle du liquide. Ainsi, elle s'élève dans le liquide. On illustre donc le principe du transfert thermique par convection.

3. Si le liquide transparent conduisait bien la chaleur, alors le transfert thermique par conduction permettrait d'augmenter rapidement la température du liquide jusqu'en haut. Si cette dernière devenait supérieure à la température de fusion de la cire, alors la cire ne repasserait jamais à l'état solide et ne redescendrait donc jamais dans le liquide transparent.

4. Il faudrait $R = \Delta T/\Phi = 10/15 = 0,67 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$ pour maintenir une telle différence de température. Dans la réalité, R n'a pas besoin d'être aussi fort.

21 1. a. Le transfert thermique se fait sans contact et sans mouvement de matière : c'est un transfert par rayonnement.

b. La paroi vitrée limite le mouvement vertical ascendant de l'air chauffé dans le four, limitant ainsi les pertes par convection thermique.

2. La température des parois augmente. Ainsi, l'agitation des atomes constituant les parois augmente. Les molécules d'air qui viennent frapper la surface de la paroi sont ainsi accélérées. Leur agitation augmente. La température de l'air contenue dans le four augmente donc.

3. a. Pour que la température reste constante, il faut que la puissance sortante soit égale à la puissance entrante. Ainsi, $R = \Delta T / \Phi = (120 - 70) / 200 = 0,25 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$.

b. Il n'y a pas que la conduction qui est responsable des pertes : l'énergie est également transférée vers l'extérieur par rayonnement.

22 1. La température est liée à l'agitation thermique. Si elle augmente, alors l'agitation augmente. Les électrons sont tellement agités qu'ils s'échappent des atomes, laissant le noyau nu.

2. Sous l'effet de l'énergie thermique provenant du cœur du Soleil, le plasma plus chaud et moins dense est animé d'un mouvement radial ascendant : il remonte vers la surface du Soleil, tandis que du plasma venant d'une zone plus éloignée du noyau redescend. Ainsi, la convection thermique crée un mouvement circulaire de particules chargées permettant peut-être de générer des champs magnétiques.

3. Puisque l'énergie thermique du Soleil traverse l'espace, c'est qu'elle n'a pas besoin de support matériel. Il s'agit donc d'un transfert thermique par rayonnement.

23 1. a. Le transfert thermique mis en jeu au niveau du tube de métal est la conduction thermique.

b. Les métaux sont de bons conducteurs thermiques (en raison de la présence des électrons libres).

2. a. Ce système n'est jamais installé dans la partie basse du réfrigérateur car le transfert thermique par convection permet de répartir l'énergie thermique dans le réfrigérateur. Pour cela, l'air le plus dense (donc le plus froid) doit se trouver au-dessus.

b. Le transfert par convection est dû à un mouvement de l'air en raison d'une différence de densité. Dans l'air chaud, les molécules sont plus agitées et donc plus espacées que dans l'air froid. L'air chaud a donc une densité plus faible que l'air froid et s'élève.

3. a. $\Phi = \Delta T / R = (20 - 4) / 0,89 = 18 \text{ W}$.

b. $1 \text{ an} = 365,25 \times 24 = 8\,766 \text{ h}$.

Ainsi, $\Delta E = P \cdot t = 18 \times 8\,766 = 158 \text{ kWh}$.

c. Ce transfert se fait depuis l'extérieur vers l'intérieur du réfrigérateur.

24 Le chauffe-eau solaire

1. a. Quel transfert thermique permet de chauffer le fluide du chauffe-eau ?

Le transfert thermique qui chauffe l'eau se fait par rayonnement.

b. Le système ne comporte pas de pompe pour amener le fluide jusqu'au réservoir. Comment cela fonctionne-t-il ? L'eau chauffée dans les conduites se dilate et devient moins dense que l'eau froide. Elle monte jusqu'au réservoir par convection. C'est le principe du thermosiphon.

2. Le réservoir est recouvert de papier métallisé puis d'un isolant thermique. Montrer que, dans ce système, les trois modes de transferts thermiques sont fortement limités.

Le réservoir perd une énergie de $6,0 \text{ kJ}$ par heure la nuit, lorsque la température extérieure est de $7,8^\circ\text{C}$ et que l'eau à l'intérieur atteint 55°C .

Le réservoir est clos : donc pas de pertes de matière. Le transfert thermique par convection est donc impossible. Le papier métallisé limite le transfert thermique par rayonnement. Le matériau isolant est choisi pour sa forte résistance thermique : il limite les transferts thermiques par conduction.

3. a. Calculer la puissance qui traverse le matériau isolant. On a $P = \Delta E / t = 6,0 \times 10^3 / 60 = 100 \text{ W}$.

b. En déduire la résistance thermique du matériau isolant. $R = \Delta T / \Phi = (55 - 7,8) / 100 = 4,7 \times 10^{-1} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$.

25 1. a. $T_2 - T_1 = R_A \cdot \Phi$; $T_3 - T_2 = R_B \cdot \Phi$

et $T_4 - T_3 = R_C \cdot \Phi$.

b. $T_4 - T_1 = R_T \cdot \Phi$.

c. On fait la somme des trois expressions écrites au a. : $T_2 - T_1 + T_3 - T_2 + T_4 - T_3 = R_A \cdot \Phi + R_B \cdot \Phi + R_C \cdot \Phi$, soit $T_4 - T_1 = (R_A + R_B + R_C) \cdot \Phi$. En identifiant avec la relation écrite au b., on écrit que $R_T = R_A + R_B + R_C$.

2. Chaque plaque A, B, C est traversée par son propre flux thermique Φ_A , Φ_B et Φ_C .

a. $\Phi_T = \Phi_A + \Phi_B + \Phi_C$.

b. $\Phi_A = (T_2 - T_1) / R_A$, $\Phi_B = (T_2 - T_1) / R_B$ et

$\Phi_C = (T_2 - T_1) / R_C$.

c. Avec cette nouvelle grandeur, on peut écrire :

$$\Phi_A = (T_2 - T_1) \cdot G_A, \Phi_B = (T_2 - T_1) \cdot G_B,$$

$$\Phi_C = (T_2 - T_1) \cdot G_C \text{ et } \Phi_T = (T_2 - T_1) \cdot G_T.$$

Ainsi, $\Phi_T = (T_2 - T_1) \cdot G_A + (T_2 - T_1) \cdot G_B + (T_2 - T_1) \cdot G_C$
 $= (T_2 - T_1) \cdot (G_A + G_B + G_C)$.

On en déduit $G_T = (G_A + G_B + G_C)$.

26 La loi d'Ohm

La tension électrique U est une différence d'état électrique entre deux points d'un circuit. Cette différence d'état engendre la circulation d'un courant électrique I à travers les fils de connexion afin de la compenser. Les fils traversés « résistent » au passage du courant, selon la loi : $U = R \cdot I$, où R est la résistance électrique du fil.

1. À partir des informations fournies, retrouver les correspondances entre les grandeurs électriques citées et les grandeurs thermiques du cours.

La différence de température entre les deux faces d'une paroi engendre la circulation d'un flux thermique afin de la compenser. La paroi traversée « résiste » au transfert, selon la loi : $\Delta T = R \cdot \Phi$ où R est la résistance thermique. Ainsi, le flux thermique s'apparente au courant électrique et la différence de température à la tension électrique.

2. Une pompe à chaleur permet de maintenir une différence de température entre deux faces d'un matériau. Quel est l'équivalent électrique de la pompe à chaleur ? L'équivalent électrique de la pompe à chaleur est un générateur de tension : il maintient la tension entre deux points du circuit.

EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

27 1. b. $k = e/S$. Ainsi, l'unité de k est m^{-1} et le produit $k \cdot \rho$ s'exprime alors en $\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$, comme une résistance thermique.

2. a. Ainsi, R augmente si on augmente l'épaisseur e de matériau.

b. R diminue si on augmente la surface S .

3. a. $R = \Delta T / \Phi = (50 - 20) / 0,394 = 76,1 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$.

b. $\rho = R/k = R \cdot S/e = 76,1 \times \pi \times (2,5 \times 10^{-3})^2 / 0,10 = 1,5 \times 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}$.

c. Le métal de la tige est donc de l'étain : $1,5 \times 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m} = 15 \text{ mK} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}$.

d. Dans les mêmes conditions, avec une tige identique d'argent :

$$\begin{aligned} \Phi &= \Delta T / R = \Delta T \cdot S / (e \cdot \rho) \\ &= (50 - 20) \times \pi \times (2,5 \times 10^{-3})^2 / (0,10 \times 2,3 \times 10^{-3}) \\ &= 2,6 \text{ W}. \end{aligned}$$

28 1. Au niveau microscopique, les molécules d'air de basse altitude sont plus agitées. Les chocs qu'elles font alors subir aux molécules se trouvant au-dessus transmettent cette agitation. Sans déplacement de matière, l'agitation moléculaire se déplace ainsi de proche en proche.

2. a. Il s'agit du phénomène de convection thermique.

b. La température de l'air qui monte diminue de 1°C par 100 m, comme l'indique l'énoncé.

c. La température de l'air alentour diminue plus vite, augmentant la différence de température avec l'air ascendant et amplifiant le phénomène de convection, d'où le terme « instabilité ».

3. a. Si la vapeur d'eau se condense, le dégagement de chaleur limite la diminution de température lors de l'élévation. La différence de température entre l'air atmosphérique et l'air ascendant dans le nuage est encore plus grande, ce qui tend à augmenter encore la convection.

b. Les courants ascendants ainsi créés sont suffisants pour maintenir en l'air les gouttelettes d'eau formées.

Énergie interne

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
<ul style="list-style-type: none"> - Notions de système et d'énergie interne. - Interprétation microscopique. - Capacité thermique. - Bilans d'énergie. 	<ul style="list-style-type: none"> - Savoir que l'énergie interne d'un système macroscopique résulte de contributions microscopiques. - Connaître et exploiter la relation entre la variation d'énergie interne et la variation de température pour un corps dans un état condensé. - Établir un bilan énergétique faisant intervenir transfert thermique et travail.

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Savoir que l'énergie interne d'un système macroscopique résulte de contributions microscopiques.
2. Connaître et exploiter la relation $\Delta U = C \cdot \Delta T$.
3. Établir un bilan énergétique faisant intervenir transfert thermique et travail.

Évaluation diagnostique

p. 384

SITUATION 1

L'objectif pédagogique de la situation proposée est d'introduire la notion d'énergie interne.

On peut effectuer un transfert thermique par chauffage ou refroidissement du contenu du verre d'eau. Il sera le siège d'un transfert d'énergie sans que son énergie cinétique macroscopique ni son énergie potentielle de pesanteur ne soient modifiées.

Cette activité fait le lien avec l'**activité 1** qui introduit une nouvelle forme d'énergie grâce à une démarche d'investigation sur le ressort.

SITUATION 2

L'objectif pédagogique de la situation proposée est de réinvestir les notions de cohésion de la matière étudiées en classe de Première S.

La distance entre les particules (atomes ou molécules) varie selon l'état physique. Les déplacements de ces particules dépendent également de l'état physique (vibration ou oscillation à l'état solide ; translation et rotation possibles à l'état liquide ou gaz). Enfin, leurs vitesses dépendent également de l'état physique.

Cette activité fait le lien avec l'**activité 2** qui présente la nature des contributions microscopiques à l'énergie interne et leur répartition selon l'état physique du système.

SITUATION 3

L'objectif pédagogique de la situation proposée est de réfléchir aux notions de système et de transfert énergétique en réinvestissant les notions de transfert thermique et de travail (ou énergie) électrique.

L'intérieur du réfrigérateur est « froid », donc le fluide prélève de la chaleur à l'intérieur du réfrigérateur (premier transfert thermique). Mais le réfrigérateur reçoit aussi de l'énergie électrique par la prise de courant. Enfin, l'arrière du réfrigérateur est chaud (deuxième transfert thermique).

Cette activité fait le lien avec l'**activité 4** qui présente un bilan énergétique dans le cas d'une machine thermique ditherme réfrigérante comme les réfrigérateurs. Y a-t-il un lien entre le travail électrique et les transferts thermiques mis en évidence dans l'activité diagnostique ?

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

Une nouvelle forme d'énergie

p. 386

1. Oui, car il y a déplacement du point d'application situé sur le ressort quand s'exerce la force de la porte sur le ressort (la force n'étant pas perpendiculaire au déplacement).

2. Les corps étudiés sont la porte et le ressort, il y a transfert énergétique par travail de la force qu'exerce la porte sur le ressort.

3. Oui, il y a transfert d'énergie de la porte vers le ressort.

4. a. Énergie cinétique, masse et vitesse influent (cas de la translation).

b. L'énergie cinétique est nulle dans les deux cas.

5. a. E_{pp} dépend de la masse et de la position sur la Terre (altitude z essentiellement et g qui varie).

b. Non, car masse et position (du centre d'inertie) ne changent pas.

6. E_c et E_{pp} . D'après le document, le ressort a donc stocké de l'énergie interne.

7. a. Une déformation est élastique lorsque l'objet, déformé par une contrainte, retrouve sa forme initiale une fois la contrainte supprimée. Exemples : caoutchouc, acier dans un ressort. Certains gaz à basse pression et liquides ont un comportement élastique.

b. Le rapprochement ou l'éloignement des particules modifient leur interaction.

8. Oui, d'après notre étude.

9. Il s'agit d'une énergie interne au système, liée à sa structure microscopique.

ACTIVITÉ 2

Une énergie au cœur de la matière

p. 387

1. À la température T .

2. Les particules du système sont en mouvement et possèdent chacune une énergie cinétique.

3. a. La contribution de l'énergie cinétique microscopique augmente lorsqu'on passe du solide au liquide, puis au gaz.

b. On peut l'expliquer par des déplacements plus faciles liés à la structure de la matière.

4. a. L'intensité de l'énergie potentielle diminue avec la distance d'après les formes d' E_p d'interaction microscopique proposées dans le tableau.

b. Les distances entre les particules sont très grandes à l'état gazeux.

5. a. Il n'y a pas de contribution de van der Waals pour les deux charges. Ordre de grandeur de $U_{p(\text{électrostatique})}$: 10^{-19} J ; ordre de grandeur de $U_{p(\text{gravitationnelle})}$: 10^{-55} J.

b. L'interaction gravitationnelle est négligeable à l'échelle atomique (contribution utile pour le calcul de l'énergie interne de systèmes stellaires).

6. Dans un 1 mL d'eau, il y a 3×10^{22} molécules à étudier, on ne peut pas étudier le mouvement de chaque molécule mais seulement atteindre des valeurs moyennes.

7. Le système peut stocker de l'énergie sous forme d'énergie interne : la vitesse de ses particules donc son

énergie cinétique microscopique peut varier, ou la distance entre les particules peut être modifiée ainsi que l'énergie potentielle d'interaction entre les particules.

ACTIVITÉ 3

Capacité thermique

et variation de température

p. 388

1. a. $\Delta U_{\{\text{eau1}\}} = m_1 \cdot c_{\text{eau}} \cdot (T_3 - T_1)$.

b. $\Delta U_{\{\text{eau2}\}} = m_2 \cdot c_{\text{eau}} \cdot (T_3 - T_2)$.

2. a. D'après le principe de conservation de l'énergie appliquée au système {eau1 + eau2 + calorimètre} qui ne reçoit ni travail ni transfert thermique du milieu extérieur :

$\Delta U_{\{\text{eau1+eau2+calorimètre}\}} = 0 = \Delta U_{\{\text{eau1}\}} + \Delta U_{\{\text{eau2}\}} + \Delta U_{\{\text{calo}\}}$

$\Delta U_{\{\text{calo}\}} = -(\Delta U_{\{\text{eau1}\}} + \Delta U_{\{\text{eau2}\}})$.

b. $\Delta U_{\{\text{calo}\}} = C_{\text{calo}} \cdot (T_3 - T_1)$;

$C_{\text{calo}} = \Delta U_{\{\text{calo}\}} / (T_3 - T_1)$. Ordre de grandeur fréquemment mesuré : $10^2 \text{ J} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

3. a. Discussion autour des sources d'erreurs dues à la méthode, à l'opérateur, aux instruments de mesure ; calcul d'écart-type possible.

b. On pourra retenir la valeur moyenne si l'écart-type est suffisamment faible.

4. a. $\Delta U_{\{\text{eau}\}} = m_4 \cdot c_{\text{eau}} \cdot (T_f - T_4)$.

b. $\Delta U_{\{\text{calo}\}} = C_{\text{calo}} \cdot (T_f - T_4)$.

5. a. D'après le principe de conservation de l'énergie appliquée au système {eau + matériau + calorimètre} qui ne reçoit ni travail ni transfert thermique du milieu extérieur : $\Delta U_{\{\text{eau1+eau2+calo}\}} = 0$

$= \Delta U_{\{\text{eau}\}} + \Delta U_{\{\text{matériau}\}} + \Delta U_{\{\text{calo}\}}$

c. L'incertitude porte sur le dernier chiffre significatif de la valeur.

6. Exemples de proposition : amélioration du protocole pour limiter les fuites, répéter l'expérience, choisir un matériel plus performant le cas échéant...

7. $c_{\text{brique normale}} = 8 \times 10^2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$;

$c_{\text{béton}} = 9 \times 10^2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$; $c_{\text{bois}} > 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ variable selon les bois.

8. Plus la capacité thermique est grande, plus le matériau peut accumuler de l'énergie interne (construction d'un mur accumulateur près d'une source chaude).

ACTIVITÉ 4

Quelle chaleur dans mon frigo ?

p. 389

1. a. Le fluide frigorigène.

b. L'énergie interne.

2. a. Le système est en interaction avec le réseau électrique, l'intérieur du réfrigérateur et l'air extérieur.

b. Transfert thermique et travail électrique.

3. a. Transfert reçu > 0 ; transfert cédé < 0 .
 b. $W_e > 0$ car le réseau électrique fournit du travail ou de l'énergie électrique au système.
 4. $\Delta U = W_e + Q_c + Q_f$.
 5. a. Liquide et gazeux.
 b. Au terme de chaque cycle, le fluide est dans le même état physique avec la même température (même $E_{c, \text{micro}}$) et la même énergie potentielle d'interaction.
 c. $\Delta U = 0 = W_e + Q_c + Q_f$.
 6. $EER = |Q_f/W_e|$.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : Savoir que l'énergie interne d'un système macroscopique résulte de contributions microscopiques

1. 1. Vrai.
 2. Faux. L'énergie interne U d'un objet sur la Terre ne contient pas l'énergie potentielle de pesanteur.
 3. Faux. L'énergie interne comprend aussi l'énergie potentielle d'interaction entre les entités.
 4. Faux. L'énergie potentielle d'interaction augmente lorsque les entités se rapprochent.
2. 1. Un système est un ensemble macroscopique d'entités microscopiques (atomes, ions ou molécules). Le système est séparé du milieu extérieur par la frontière interface où peuvent avoir lieu des transferts d'énergie.
 2. a. et b. L'énergie cinétique microscopique dépend de la température du système, l'énergie potentielle d'interaction dépend de la nature des particules et de leur distance.

4. 1. c. 2. d. 3. b. 4. a.

5. 1. La température de l'eau augmente, donc son énergie interne varie.
 2. L'agitation des molécules d'eau croît avec la température. L'énergie cinétique microscopique du système augmente (cas traité avant ébullition).

6. 1. Le tireur a transféré de l'énergie au système {arc} par le travail d'une force $\vec{F}_{\text{main/corde}}$ dont le point d'application (l'extrémité de la flèche) s'est déplacé.
 2. Le système {arc} a reçu le travail d'une force sans autre échange avec le milieu extérieur, donc l'énergie totale du système augmente.
 3. L'arc est immobile avant et après l'action du tireur, donc $\Delta E_c = 0$. L'altitude du système n'a pas varié, donc $\Delta E_{pp} = 0$. Le système a accumulé de l'énergie interne U .

4. L'étirement de l'arc modifie la distance entre les atomes qui le constituent et modifie les énergies potentielles d'interaction entre les atomes.

7. 1. U ne dépend que de la température T , donc seule l'énergie cinétique microscopique contribue à l'énergie interne U . Les énergies potentielles d'interaction sont donc nulles.

2. À basse pression, les distances entre les entités du gaz (atomes ou molécules) augmentent, donc les énergies potentielles d'interaction diminuent lorsque la pression diminue.

COMPÉTENCE 2 : Connaître et exploiter la relation $\Delta U = C \cdot \Delta T$

8. 1. b et d. 2. a. 3. a.

9. 1. Vrai. 2. Faux. 3. Vrai.

4. Faux. En cas de changement d'état ou de certaines transformations chimiques, l'énergie interne peut augmenter malgré une température du système qui ne varie pas.

10. 1. La variation d'énergie interne est proportionnelle à la variation de température, donc :

$$\Delta U = 10 \times 1,6 \times 10^4 = 1,6 \times 10^5 \text{ J}$$

pour une élévation de température et $-1,6 \times 10^5 \text{ J}$ pour une baisse de température.

2. $C = \Delta U/\Delta T$ soit $C = 1,6 \times 10^4/1,0 = 1,6 \times 10^4 \text{ J} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

3. a. $c = C/m$.

b. $c = 1,6 \times 10^4/20 = 8,0 \times 10^2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

11. 1. Pour le système lait, en l'absence de changement d'état et de transformation chimique : $c = \Delta U/(m \cdot \Delta T)$; $c = 55,5 \times 10^3/(0,500 \times (50 - 20)) = 3,7 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

2. Écart relatif = $|3,7 \times 10^3 - 4,18 \times 10^3|/(4,18 \times 10^3) = 0,11 = 11 \%$.

Le lait contient 87 % d'eau et le reste est essentiellement constitué de matières grasses. Donc la valeur de capacité thermique du lait est proche de celle de l'eau mais moindre.

3. Une tasse de thé contient essentiellement de l'eau, donc la capacité thermique massique du thé est très proche de celle de l'eau.

12 Douche solaire pour camping

Si vous baroudez un peu mais que l'idée de passer des jours sans pouvoir se laver ailleurs que dans de froids ruisseaux vous rebute, pourquoi ne pas envisager une douche solaire ? 5,0 gallons d'eau sont chauffés par le Soleil de 15 °C à 35 °C. Un gallon vaut 4,54 litres.

Calculer la variation de l'énergie interne de l'eau.

Pour le système {eau}, $\Delta U = m \cdot c_{\text{eau}} \cdot \Delta T$ avec $m = \rho \cdot V$; $\Delta U = 1,00 \times 5,0 \times 4,54 \times 4,18 \times 10^3 \times (35 - 15) = 1,9 \times 10^6 \text{ J}$.

13 1. Pour le système {café}, en l'absence de changement d'état et de transformation chimique :

$$\Delta U_{\text{(café)}} = \rho_{\text{eau}} \cdot V \cdot c \cdot \Delta T ;$$

$$\Delta U_{\text{(café)}} = 1,00 \times 1,0 \times 4,18 \times 10^3 \times (52 - 60) = -3,3 \times 10^4 \text{ J.}$$

2. La bouteille de thermos parfaitement isolée ne reçoit ni travail ni transfert thermique du milieu. Donc d'après le principe de conservation de l'énergie appliquée au système café + thermos : $\Delta E_{\text{totale}\{\text{café}+\text{thermos}\}} = 0$. Puisque ni l'énergie cinétique du système (immobile) ni son énergie potentielle de pesanteur ne varient, alors : $\Delta E_{\text{totale}\{\text{café}+\text{thermos}\}} = \Delta U_{\{\text{café}+\text{thermos}\}} = 0$, la variation d'énergie interne du système est nulle.

3. D'après le principe de conservation de l'énergie, $\Delta U_{\{\text{café}+\text{thermos}\}} = \Delta U_{\{\text{café}\}} + \Delta U_{\{\text{thermos}\}} = 0$, donc :

$$\Delta U_{\{\text{thermos}\}} = -\Delta U_{\{\text{café}\}} = 3,3 \times 10^4 \text{ J.}$$

4. $\Delta U_{\{\text{thermos}\}} = C_{\text{thermos}} \cdot \Delta T$; $C_{\text{thermos}} = \Delta U_{\{\text{thermos}\}} / \Delta T$;
 $C_{\text{thermos}} = 3,3 \times 10^4 / (52 - 20) = 1,0 \times 10^3 \text{ J} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

14 1. La couleur noire permet d'absorber une plus grande quantité d'énergie transférée par rayonnement.

2. L'énergie est accumulée par le mur sous forme d'énergie interne.

3. Pour le système {mur}, en l'absence de changement d'état et de transformation chimique :

$$\Delta U = m \cdot c \cdot \Delta T, \text{ d'où } c = \Delta U / (m \cdot \Delta T) ;$$

$$c = 400 \times 10^6 / (5,0 \times 10^3 \times (60 - 10)) = 1,6 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}.$$

Le mur est construit en brique pleine.

COMPÉTENCE 3 : Établir un bilan énergétique faisant intervenir transfert thermique et travail

15 1. Faux. Il faut ajouter son énergie interne U .

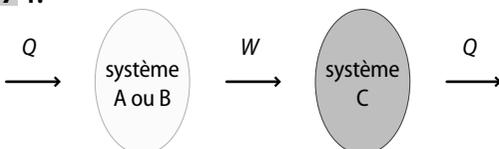
2. Vrai.

3. Faux. D'après le principe de conservation de l'énergie, l'énergie n'est pas détruite, mais transférée du système au milieu extérieur.

16 1. $Q = 4,0 \text{ kJ} > 0$ car transfert thermique reçu par le système, $W = -2,7 \text{ kJ} < 0$ car travail cédé par le système.

2. $\Delta E_{\text{totale}} = W + Q = 1,3 \text{ kJ}$; globalement le système a reçu de l'énergie.

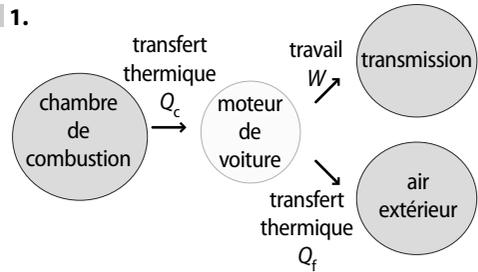
17 1.



2. $\Delta E_{\text{totale}\{\text{A}\}} = W + Q = +100 \text{ J}$; $\Delta E_{\text{totale}\{\text{B}\}} = W + Q = 0 \text{ J}$;
 $\Delta E_{\text{totale}\{\text{C}\}} = W + Q = -20 \text{ J}$.

3. $\Delta U = \Delta E_{\text{totale}}$ et $U_{\text{finale}} = \Delta U + U_{\text{initiale}}$; $U_{\text{finale}\{\text{A}\}} = 900 \text{ J}$;
 $U_{\text{finale}\{\text{B}\}} = 500 \text{ J}$; $U_{\text{finale}\{\text{C}\}} = 80 \text{ J}$.

19 1.



2. Source froide : air extérieur ; source chaude : chambre de combustion.

3. $W = P \cdot \Delta t = -15,1 \times 10^3 \times 30 \times 60 = -2,7 \times 10^7 \text{ J}$.

4. a. La combustion est une transformation exothermique qui libère de l'énergie.

b. $Q_c = 3,6 \times 10^7 \times 3,0 = 1,1 \times 10^8 \text{ J}$.

5. Le moteur fonctionne comme une machine cyclique ditherme : au cours d'un cycle, $\Delta U_{\text{cycle}} = 0 = W + Q_c + Q_f$, d'où $Q_f = -W - Q_c$ soit $Q_f = -8,1 \times 10^7 \text{ J}$.

6. $\eta = |W/Q_c|$ soit $\eta = 25 \%$.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

20 1. Un ventilateur permet le renouvellement de l'air (mais ici les ouvertures sont fermées) et de se refroidir... sous certaines conditions.

2. On considère le système {ventilateur + pièce}. Toutes les ouvertures de la pièce sont fermées, on suppose qu'il n'y a pas de transfert thermique du milieu extérieur vers le système. Par contre, le système reçoit un travail électrique de la part du réseau électrique. D'après le principe de conservation de l'énergie : $\Delta E_{\text{totale}} = W > 0$, l'énergie du système augmente. Puisque ΔE_c et ΔE_{pp} sont nulles, alors $\Delta U > 0$. L'énergie interne du système augmente et en l'absence de changement d'état ou de transformation chimique, la température de la pièce augmente.

21 1. La capacité thermique massique est liée à la teneur en eau. Plus la teneur en eau est grande, plus la capacité thermique massique de l'aliment est importante. La capacité thermique de l'eau est très grande.

2. La forte capacité thermique massique de l'eau liquide s'explique par la présence de liaisons hydrogène intermoléculaires qui lui confère une grande énergie de cohésion.

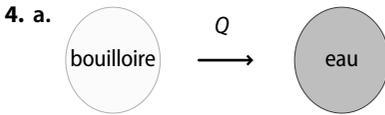
22 1. $W_e = P \cdot \Delta t = 2,2 \times 10^3 \times (40 + 60) = 2,2 \times 10^5 \text{ J}$.

2. a. L'eau reçoit un travail électrique de la part de la bouilloire, son énergie E_{totale} augmente. Le système est immobile au départ et à la fin, donc ΔE_c et $\Delta E_{pp} = 0$. Seule l'énergie interne varie et $\Delta E_{\text{totale}} = \Delta U$.

b. La température de l'eau augmente, donc son énergie cinétique microscopique augmente.

3. $\Delta U_{\text{eau}} = \rho \cdot V \cdot c \cdot \Delta T$

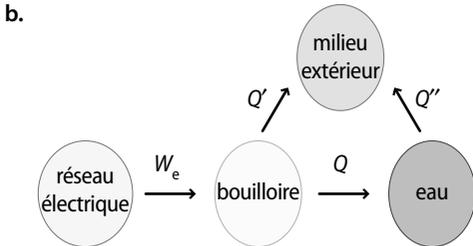
$\Delta U = 1,00 \times 0,500 \times 4,18 \times 10^3 \times (85 - 18) = 1,4 \times 10^5 \text{ J}$



On néglige à ce stade les pertes thermiques vers le milieu extérieur.

b. Pour le système {eau}, $\Delta U = Q$, si on néglige les échanges thermiques vers l'air extérieur.

5. a. $W_e \neq \Delta U$ car il y a des pertes thermiques vers le milieu extérieur.



6. $\eta = |Q/W_e| = 64 \%$

23 1. a. On mesure une élévation de la température de l'eau.

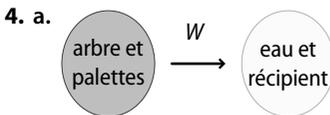
b. L'énergie cinétique microscopique de l'eau augmente.

2. a. Travail d'une force donc transfert d'énergie.

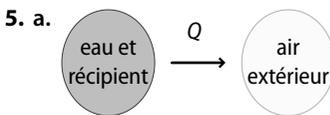
b. Il y a transfert par travail de la force de la palette sur l'eau.

3. a. Non. b. Non.

c. Le système est immobile au départ et à la fin, donc ΔE_c et $\Delta E_{pp} = 0$. Seule l'énergie interne varie.



b. D'après le principe de conservation de l'énergie appliquée au système {eau + récipient}, $\Delta U_{\text{phase1}} = W$.



b. D'après le principe de conservation de l'énergie appliquée au système {eau + récipient}, $\Delta U_{\text{phase2}} = Q$.

6. a. D'après le principe de conservation de l'énergie appliquée au système {eau + récipient} :

$\Delta U = \Delta U_{\text{phase1}} + \Delta U_{\text{phase2}} = 0$

b. On en déduit $W + Q = 0$.

7. Les expériences de Joule ont permis d'établir que le transfert thermique Q et le travail d'une force W étaient deux modes de transferts d'énergie équivalents et que la théorie du calorique était fausse.

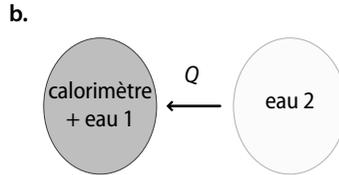
24 1. a. Le vide permet d'éviter les transferts thermiques par convection.

b. Les parois métalliques sont réfléchissantes et empêchent un transfert par rayonnement.

2. a. À l'équilibre thermique, le calorimètre et l'eau sont à la même température uniforme.

b. L'eau et les parois internes du calorimètre étant à la même température, leurs énergies cinétiques microscopiques sont égales.

3. a. L'ensemble étant parfaitement isolé, d'après le principe de conservation de l'énergie, $\Delta E_{\text{totale}} = 0$, et puisque ΔE_c et $\Delta E_{pp} = 0$, alors $\Delta U_{\text{calo+eau 1+eau 2}} = 0$.



4. a. En supposant la capacité thermique du calorimètre négligeable, d'après le principe de conservation de l'énergie, $\Delta U_{\text{eau1}} + \Delta U_{\text{eau2}} = 0$.

D'où $m_1 \cdot c_{\text{eau}} \cdot (T_f - T_1) + m_2 \cdot c_{\text{eau}} \cdot (T_f - T_2) = 0$ et $T_f = (m_1 \cdot T_1 + m_2 \cdot T_2) / (m_1 + m_2)$.

b. $T_f = 54,3 \text{ }^\circ\text{C}$.

5. La valeur expérimentale est inférieure à la valeur précédemment calculée car la capacité thermique du calorimètre n'est pas négligeable.

D'après le principe de conservation de l'énergie :

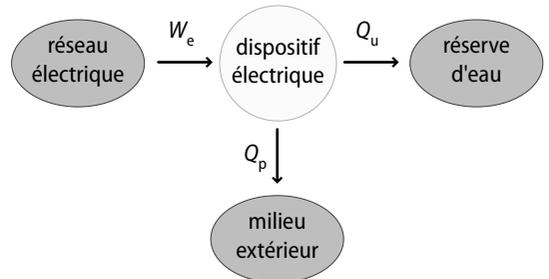
$\Delta U_{\text{eau1}} + \Delta U_{\text{eau2}} + \Delta U_{\text{calo}} = 0$

D'où $m_1 \cdot c_{\text{eau}} \cdot (T_{\text{fexp}} - T_1) + m_2 \cdot c_{\text{eau}} \cdot (T_{\text{fexp}} - T_2) + C_{\text{calo}} \cdot (T_{\text{fexp}} - T_1) = 0$

et $C_{\text{calo}} = -(m_1 \cdot c_{\text{eau}} \cdot (T_{\text{fexp}} - T_1) + m_2 \cdot c_{\text{eau}} \cdot (T_{\text{fexp}} - T_2)) / (T_{\text{fexp}} - T_1)$

$C_{\text{calo}} = 124 \text{ J} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

25 1.



2. a. $\Delta U_{\text{eau}} = \rho_{\text{eau}} \cdot V_{\text{eau}} \cdot c_{\text{eau}} \cdot (T_f - T_i) = 3,8 \times 10^7 \text{ J}$.

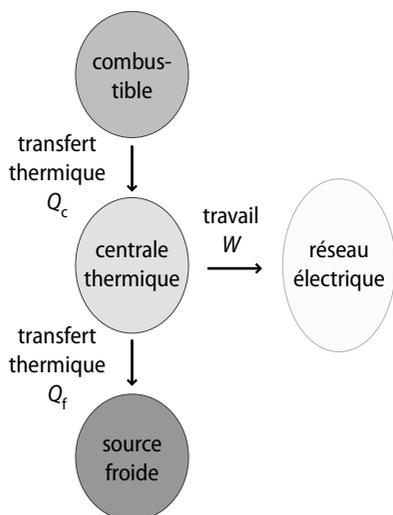
b. On suppose que le récipient est parfaitement calorifugé, donc pour le système {dispositif électrique}, $Q_u = -\Delta U_{\text{eau}} = -3,8 \times 10^7 \text{ J} < 0$.

3. L'énergie interne du dispositif ne variant pas :

$\Delta U_{\text{dispositif}} = W_e + Q_u + Q_p = 0$

4. $\eta = |Q_u/W_e|$, d'où $W_e = -Q_u/\eta = 4,7 \times 10^7 \text{ J}$.
 $\Delta U_{\text{(dispositif)}} = W_e + Q_u + Q_p = 0$
d'où $Q_p = -Q_u - W_e = -9,4 \times 10^6 \text{ J}$.

26 1. a.



b. La rivière constitue la source froide.

2. a. Le pouvoir calorifique est l'énergie dégagée par la combustion d'un combustible par unité de masse.

b. Le combustible subit une transformation chimique, donc son énergie potentielle d'interaction microscopique varie.

c. $Q_c = m \cdot \text{pouvoir calorifique}$

$$Q_c = 50 \times 10^3 \times 3,0 \times 10^7 = 1,5 \times 10^{12} \text{ J}.$$

$$3. W_e = -P \cdot \Delta t = -125 \times 10^6 \times 3\,600 = -4,50 \times 10^{11} \text{ J}.$$

$$4. \Delta U_{\text{(centrale)}} = W_e + Q_f + Q_c.$$

5. La centrale fonctionne en régime permanent donc son énergie interne ne varie pas :

$$\Delta U_{\text{(centrale)}} = W_e + Q_f + Q_c = 0 \text{ et } Q_f = -Q_c - W_e ;$$

$$Q_f = -1,05 \times 10^{12} \text{ J}.$$

6. a. Le rendement est le rapport de l'énergie utile sur l'investissement requis donc $\eta = |W_e/Q_c|$.

b. $\eta = 30 \%$.

27 Chutes d'eau

Les gigantesques chutes d'Iguazu se situent à la frontière de l'Argentine et du Brésil. La température de l'eau en amont des chutes est de $15,0 \text{ }^\circ\text{C}$. On considère un kilogramme d'eau qui chute de 82 m .

En supposant que toute l'énergie potentielle est convertie en énergie interne, calculer la température de l'eau en bas de la chute.

On étudie le système {eau} de masse 1 kg en interaction avec la Terre, on suppose que le système est isolé et que son énergie cinétique macroscopique ne varie pas entre le haut et le bas de la chute. D'après le principe de conservation de l'énergie, $\Delta E_{\text{totale}} = 0 = \Delta E_{\text{pp}} + \Delta U$.

Avec $\Delta E_{\text{pp}} = m \cdot g \cdot (0 - h)$ et $\Delta U = m \cdot c_{\text{eau}} \cdot \Delta T$, il vient $-g \cdot h + c_{\text{eau}} \cdot \Delta T = 0$, d'où $\Delta T = g \cdot h/c_{\text{eau}}$;
 $\Delta T = 9,81 \times 82/(4,18 \times 10^3) = 0,19 \text{ }^\circ\text{C}$.

La température de l'eau en bas de la chute vaut $15,2 \text{ }^\circ\text{C}$.

28 1. a. À l'état solide, l'énergie interne du système résulte de l'énergie cinétique microscopique et de l'énergie potentielle d'interaction microscopique entre les entités.

b. L'élévation de la température correspond à une augmentation de l'énergie cinétique microscopique ou énergie d'agitation thermique.

c. L'énergie interne du système augmente.

2. a. Entre 6 et 11 minutes, le paradichlorobenzène se trouve à la fois à l'état solide et à l'état liquide durant sa fusion.

b. La température ne varie plus, donc l'agitation thermique est la même. Par contre, les interactions et les distances entre les molécules se modifient en passant de l'état solide à l'état liquide. Les énergies potentielles d'interaction varient, l'énergie interne du système augmente.

3. a. Après 11 minutes, le système est à l'état liquide.

b. Après 11 minutes, le système reçoit de l'énergie par chauffage, sa température donc son énergie cinétique microscopique augmente.

4. L'affirmation est fautive puisqu'ici pendant le changement d'état, l'énergie interne varie à température constante.

29 1. a. En O, $E_{\text{pp}} = m \cdot g \cdot z_0 + C = 0 \text{ J}$ (avec la constante $C = -m \cdot g \cdot z_0 = -4,2 \times 10^4 \text{ J}$), $E_c = 0 \text{ J}$ et $U = 0 \text{ J}$, donc $E_{\text{totale}}(\text{O}) = 0 \text{ J}$.

b. D'après le principe de conservation de l'énergie appliqué au système, $E_{\text{totale}}(\text{A}) = 0 \text{ J}$.

c. Or en A, $E_{\text{pp}} = m \cdot g \cdot z_A + C = m \cdot g \cdot (z_A - z_0)$; $U = 0 \text{ J}$ et $E_c = 1/2 m \cdot v_A^2$ d'où $v_A = (2g \cdot (z_0 - z_A))^{1/2}$; $v_A = 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

2. a. D'après le principe de conservation de l'énergie appliqué au système, $E_{\text{totale}}(\text{B}) = 0 \text{ J}$.

$$\text{b. } E_c(\text{B}) = 0 \text{ J}.$$

$$\text{c. } E_{\text{pp}}(\text{B}) = m \cdot g \cdot (z_B - z_0) = -2,0 \times 10^4 \text{ J}.$$

$$\text{d. } E_{\text{totale}}(\text{B}) = E_c(\text{B}) + E_{\text{pp}}(\text{B}) + U(\text{B}) = 0 \text{ J},$$

$$\text{d'où } U(\text{B}) = +2,0 \times 10^4 \text{ J}.$$

$$\text{e. } k = 2 U(\text{B})/(\Delta T)^2 ;$$

$$k = 2 \times 2,0 \times 10^4 / (50 - 32)^2 = 1,2 \times 10^2 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}.$$

EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

30 1. c $= C_{\text{vol}} \times 3\,600/\rho_{\text{liège}} = 1,9 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

2. a. Ordre de grandeur : $10^2 \text{ W} \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$.

b. Cette valeur est 100 fois inférieure à l'effusivité des métaux.

c. Le contact du liège est « chaud » contrairement au métal ou au carrelage qui se caractérisent par une grande effusivité.

Transferts quantiques d'énergie

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
<ul style="list-style-type: none"> – Émission et absorption quantiques. – Émission stimulée et amplification d'une onde lumineuse. – Oscillateur optique : principe du laser. 	<ul style="list-style-type: none"> – Connaître le principe de l'émission stimulée et les principales propriétés du laser (directivité, monochromaticité, concentration spatiale et temporelle de l'énergie). – <i>Mettre en œuvre un protocole expérimental en utilisant un laser comme outil d'investigation ou pour transmettre de l'information.</i> – Associer un domaine spectral à la nature de la transition mise en jeu.
<ul style="list-style-type: none"> – Transition d'énergie : électroniques, vibratoires. 	

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Connaître le principe de l'émission stimulée.
2. Connaître les principales propriétés du laser.
3. Associer un domaine spectral à la nature de la transition d'énergie.

Évaluation diagnostique

p. 402

SITUATION 1

Cette situation doit permettre d'aborder les processus microscopiques responsables de la production de lumière. Les termes d'absorption et d'émission d'énergie déjà abordés en classe de Première devraient apparaître et introduire l'**activité 1**.

L'**activité 1** permet d'aborder l'ensemble des échanges d'énergie qui peuvent exister avec la matière. Un nouveau mode de transfert d'énergie est abordé : l'émission stimulée. Par souci pédagogique, les échanges d'énergies ne sont abordés que dans le cas de l'atome.

SITUATION 2

Ce dessin illustre la directivité et la puissance surfacique du laser. La lumière issue d'un laser est très directive, permettant d'obtenir des faisceaux de diamètre de l'ordre du micromètre, ce qui permet de ne pas abîmer les tissus proches de la cornée. La puissance très élevée délivrée par unité de surface, permet de corriger les défauts de la cornée. L'**activité 2** a pour objectif de comparer les propriétés d'une source de lumière classique et d'une source laser. Peut-on obtenir les mêmes propriétés (monochromaticité, directivité et puissance

surfacique) avec une autre source ? Dans l'**activité 4**, on réinvestit la notion d'émission stimulée vue dans l'**activité 3**, afin d'interpréter l'origine des propriétés du laser.

SITUATION 3

Le laser est souvent présenté comme rouge. Pourtant de plus en plus de laser sont produits de couleurs différentes. Est-il simple de changer la couleur d'un laser ? Est-ce une simple synthèse soustractive de lumière ou des transitions d'énergie au niveau de la production de lumière ?

L'**activité 3** permet de faire le lien entre les transitions d'énergie qui ont lieu dans la cavité optique du laser et la couleur émise.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

Échanges d'énergie de l'atome

p. 404

1. a. Les niveaux d'énergie étant quantifiés, les échanges d'énergie sont aussi quantifiés.
- b. Les atomes peuvent produire des couleurs différentes car leurs niveaux d'énergie sont différents suivant les atomes.
2. a. L'absorption, l'émission spontanée et l'émission stimulée.
- b. **A** absorption d'énergie ; **B** émission spontanée ; **C** émission stimulée.
3. Pour l'absorption : on peut fournir de l'énergie aux atomes avec un courant électrique. Pour l'émission spontanée : il faut placer l'atome dans un état excité, puis

spontanément l'atome émettra un photon pour retrouver un niveau d'énergie plus stable. Pour l'émission stimulée : il faut placer l'atome dans un état excité. Après la rencontre d'un photon d'énergie adaptée, l'atome retrouve un état plus stable en émettant un photon identique à celui incident.

Remarque : l'atome ne peut produire ce photon qu'à condition qu'il soit dans état excité métastable et que l'énergie du photon incident corresponde à la différence entre deux niveaux d'énergie.

4. a. Entre t_1 et t_2 : les atomes ② et ⑤ émettent deux photons supplémentaires identiques aux photons incidents, c'est donc une émission stimulée. Les atomes ④ et ③ absorbent chacun un photon. Les atomes ④ et ③ absorbent les photons.

b. Entre t_2 et t_3 : les atomes ④ et ③ émettent des photons dans des directions aléatoires. C'est donc une émission spontanée.

5. L'émission spontanée : les photons sont produits de façon spontanée par les atomes excités. Les photons produits ont des directions aléatoires et peuvent avoir des énergies différentes.

L'émission stimulée : le photon produit est identique au photon incident.

6. Le laser.

ACTIVITÉ 2

Propriétés du laser

p. 405

1. Une source particulière ?

1. Source qui produit un faisceau de lumière peu divergent.

2. En $W \cdot m^{-2}$.

3. La lentille permet d'obtenir une lumière quasi parallèle avec des sources de lumière classiques. Les lampes spectrales (sodium) peuvent produire de la lumière quasi monochromatique. La puissance surfacique de la lampe spectrale diminue avec l'inverse de la distance au carré (source sphérique de lumière). La puissance surfacique du faisceau laser diminue beaucoup moins rapidement.

La lampe spectrale, couplée à une lentille, permet d'obtenir une lumière directive et quasi monochromatique mais de puissance surfacique beaucoup plus faible que le laser.

4. Seul le laser cumule les propriétés de directivité, monochromaticité et de concentration spatiale de l'énergie.

2. Produire une lumière laser

1. Les photons non perpendiculaires aux miroirs sont absorbés par le milieu environnant.

2. Dans la situation ①.

Dans le cas ②, l'absorption est en compétition avec l'émission stimulée. Il y a moins de photons en sortie qu'à l'entrée.

3. a. Il faut davantage d'atomes capables d'émettre par émission stimulée que d'absorber. C'est le rôle du pompage optique.

b. Le miroir sélectionne les photons par leur directivité.

c. Amplifier le nombre de photons par des passages successifs de photons réinjectés dans le milieu amplificateur et sélectionner la direction des photons.

ACTIVITÉ 3

La lumière d'un laser est-elle toujours rouge ?

p. 406

1. a. L'atome peut emmagasiner de l'énergie en plaçant ses électrons dans des états d'énergie excités.

b. $E = h \cdot c / \lambda = 3,14 \times 10^{-19} \text{ J}$.

c. Dans le domaine visible.

2. a. Elle peut emmagasiner de l'énergie sous forme vibratoire et aussi en plaçant ses électrons dans des états d'énergie excités.

b. De l'énergie vibratoire.

c. Non, une molécule dans un état vibratoire excité peut se désexciter par émission stimulée. C'est le cas de la molécule de dioxyde de carbone.

d. La transition $E_3 - E_1$ correspond à $\lambda_1 = 9,6 \mu\text{m}$; la transition $E_3 - E_2$ correspond à $\lambda_2 = 10,6 \mu\text{m}$.

e. $E_{E_3-E_1} = h \cdot c / \lambda_1 = 2,07 \times 10^{-20} \text{ J}$;

$E_{E_3-E_2} = h \cdot c / \lambda_2 = 1,87 \times 10^{-20} \text{ J}$.

f. Dans le domaine infrarouge.

3. a. Transitions d'énergie électroniques et vibratoires.

b. Transition d'énergie électronique : domaine visible (et UV). Transition d'origine vibratoire : domaine IR.

c. $10^{-19} / 10^{-20} = 10$. Les transitions d'énergie électroniques sont de l'ordre de dix fois plus énergétiques que les transitions d'énergie vibratoires.

4. Non, tout dépend des transitions d'énergie mises en jeu dans le milieu amplificateur.

ACTIVITÉ 4

Laser et transmission d'informations

p. 407

1. a. Modification de la fréquence du son produit.

b. En modulant son intensité.

2. L'intensité du son produit diminue.

3. a. Voir expérience.

b. et c. U_p (ampoule) est proportionnelle à l'inverse de la distance au carré caractéristique des sources sphériques. U_p (laser) diminue, mais beaucoup moins rapidement que pour l'ampoule.

4. Le laser répond très bien à ces fréquences (comportant beaucoup d'harmoniques) et reproduit fidèlement

la tension sous forme de signal lumineux. L'ampoule ne réagit pratiquement pas aux variations et agit comme un filtre passe bas.

- Aucune conséquence sur le signal.
- La directivité et la concentration spatiale de l'énergie (*monochromaticité non évoquée ici, mais la faible dispersion du signal est aussi une qualité du laser dans le domaine de la communication*).
- Le laser réagit rapidement aux variations de tension modulant son signal.
- Le signal optique est insensible aux signaux parasites (optique et électromagnétique).

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : Connaître le principe de l'émission stimulée

- 1. Vrai.**
- Vrai.**
- Faux.** Les atomes, molécules ou ions ont une multitude d'états excités.
- Vrai.**
- Vrai.**
- Faux.** C'est un moyen pour la matière d'atteindre un état plus stable, donc de plus basse énergie.
- 1.** Les deux transferts d'énergie illustrés sont l'émission stimulée et l'absorption.
- Amplification de l'onde incidente.
- 1.** Oui, les atomes émettent un rayonnement pour gagner un état plus stable.
- Les transferts d'énergie sont quantifiés.
- 1.** E_0 est l'état fondamental, les autres correspondent aux états excités.
- a** : absorption d'énergie, **b** et **c** : émission.
- Absorption d'un photon, passage d'un courant électrique dans un gaz, collision avec d'autres particules.
- L'émission spontanée ou l'émission stimulée.

COMPÉTENCE 2 : Connaître les principales propriétés du laser

- 1. Faux.** Il utilise l'émission stimulée.
- Faux.** Le faisceau est très directionnel.
- Vrai.**
- Vrai.**
- Vrai.**

6. Faux. Au passage d'un prisme, il peut changer de direction.

- 1. b et c.**
- a et b.**
- c et d.**

8 1. La directivité.

2. Un élément dispersif pour la monochromaticité, un luxmètre pour la concentration spatiale de l'énergie.

9 Le faible diamètre du trou (100 μm environ) est une manifestation de la concentration spatiale de l'énergie.

10 1. $P = E/\Delta t = 1 \times 10^{13} \text{ W}$.

2. Cette puissance énorme est produite sur des durées de l'ordre de la femtoseconde.

11 C'est la monochromaticité.

12 1. Pour qu'un milieu soit susceptible d'amplifier une onde lumineuse, il faut davantage d'atomes, molécules ou ions dans un état excité que dans l'état fondamental, ce qui n'est pas le cas ici.

2. Réaliser une inversion de population par exemple par pompage optique.

COMPÉTENCE 3 : Associer un domaine spectral à la nature de la transition d'énergie

- 1. c.**
- c.**
- a.**

14 Le laser au dioxyde de carbone

Le laser au dioxyde de carbone est constitué d'une cavité contenant un mélange de diazote et de dioxyde de carbone. Le CO_2 émet une radiation monochromatique de longueur d'onde $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$. Quel type de transition d'énergie est responsable de cette émission ?

La radiation produite est dans le domaine de l'infrarouge : c'est donc une transition d'énergie vibratoire.

15 Ce sont des transitions d'énergie électroniques (cours).

16 1. Non car il y a des niveaux d'énergie de vibration.

- a.** C'est une transition d'énergie électronique.
- Le domaine visible/UV.
- a.** C'est une transition d'énergie vibratoire.
- Le domaine IR.

17 La transition d'énergie électronique est plus énergétique car d'après la relation $E = h \cdot c/\lambda$, plus l'émission est de courte longueur d'onde plus elle est énergétique.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

19 Les signaux optiques peuvent se chevaucher sans se perturber (voir **activité 4**).

20 1. a. On matérialise la transition par une flèche allant du niveau E_0 au niveau E_2 .

b. C'est une transition électronique, car elle est liée à des atomes. Par ailleurs, la valeur de cette transition (20 eV), largement supérieure à l'électronvolt, montre également que c'est une transition électronique.

c. C'est une absorption quantique d'énergie.

2. a. $h \cdot c/\lambda = E_2 - E_1 = 2,0$ eV, donc :

$$\begin{aligned}\lambda &= h \cdot c / (E_2 - E_1) \\ &= 6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8 / (2,0 \times 1,60 \times 10^{-19}) \\ &= 6,2 \times 10^{-7} \text{ m} = 620 \text{ nm}.\end{aligned}$$

b. Cette transition émet le domaine visible.

c. C'est une transition d'énergie électronique (elle émet dans le domaine visible).

d. Elle correspond à une émission stimulée.

21 La transition a pour énergie :

$$E = -2,01 + 5,39 = 3,38 \text{ eV} = 5,40 \times 10^{-19} \text{ J}.$$

Donc $E = h \cdot c/\lambda$, ainsi $\lambda = 368$ nm. Le domaine de longueur d'onde est le domaine UV. C'est une transition d'énergie électronique.

22 1. a : deux miroirs, **b :** lampe flash, **c :** ions ou molécules, **d :** interrupteur, **e :** générateur.

2. a. La lampe sert à l'inversion de population du milieu amplificateur et à maintenir l'inversion de population (oscillateur entretenu).

b. Passage d'un courant électrique.

3. Sélectionner les photons en fonction de leur direction et amplifier le nombre de photons en les réinjectant.

23 1. Dans leur état fondamental.

2. Une transition de E_0 vers E_3 .

3. Pour éviter l'absorption qui rentrerait en compétition avec l'émission stimulée.

4. Une transition vibratoire.

5. Dans le domaine IR.

6. $E = (h \cdot c)/\lambda = 2,1 \times 10^{-20}$ J.

24 1. $D = 1,2 \times 10^5$ m.

2. Surface = $1,1 \times 10^{10}$ m², soit :

$$P_{\text{réémis/m}^2}^2 = (15 \times 10^3 / 50 \times 10^{-9}) / (1,1 \times 10^{10}) = 27 \text{ W/m}^2.$$

Surface du réflecteur :

$$S = 1^2 \times 3,14 = 3,14 \text{ m}^2, \text{ ainsi } P_{\text{réémis}} = 85 \text{ W}.$$

3. Diamètre de la tache de retour sur Terre $D = 296$ m. Surface = 7×10^4 m². $P_{\text{reçue}} = 3,81$ MW.

4. La concentration temporelle de l'énergie et la direction.

$$\begin{aligned}25 \ 1. \ N(E_1)/N(E_0) &= A \exp(-E_1/(kT)) / A \exp(-E_0/(kT)) \\ &= \exp((E_0 - E_1)/(kT)).\end{aligned}$$

2. a. $N_1/N_0 \approx N_2/N_0 \approx 0$.

b. À 298 K, les atomes sont principalement dans leur état fondamental. $N_0 \gg N_1$ ou N_2 .

3. a. Ces photons seront principalement absorbés par le milieu.

b. Affaiblissement de l'onde.

4. Éviter l'absorption et favoriser l'émission stimulée.

26 1. $[\Delta v] = T^{-1} \cdot ((L^2 \cdot M \cdot T^{-2} \cdot \theta^{-1} \cdot \theta) / M)^{1/2} / (L \cdot T^{-1}) = T^{-1}$. La relation est bien homogène à une fréquence.

2. Les atomes s'agitent dans des directions et des sens aléatoires. Les radiations émises par les atomes se déplaçant dans le sens de l'observateur seront perçus avec une fréquence plus élevée que celle produite par des atomes se déplaçant dans un sens opposé. Cette agitation des atomes émetteurs de radiations produit une largeur de la raie d'émission (raie produite par effet Doppler).

3. $\Delta v = 1,29$ GHz.

4. $\Delta v/v = 1,29/4,7 \times 10^5 = 2,7 \times 10^{-6}$.

5. Oui, $\Delta v/v = 2,7 \times 10^{-6}$.

EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

27 1. a. Sur le schéma, seules les ondes qui ont leur longueur d'onde qui vérifie $L = k \cdot \lambda/2$ peuvent exister.

b. $L = k \cdot c \cdot T_k/2 = (k \cdot c)/(2 \cdot \nu_k)$, soit $\nu_k = (k \cdot c)/(2L)$.

c. Entre deux fréquences successives :

$$\nu_{k+1} - \nu_k = \Delta \nu = c/(2L).$$

2. La cavité a un double rôle :

– amplificateur de photons par un phénomène de rétroaction, les photons réfléchis vont générer d'autres émissions stimulées ;

– filtre fréquentiel. Seules certaines fréquences peuvent exister dans la cavité et donc être produites par le laser.

3. a. Non, plusieurs pics de fréquence.

b. Ce sont les fréquences qui peuvent exister dans la cavité.

c. $\Delta \nu = c/\Delta \lambda = c/(2L)$, donc $\Delta \lambda = 2L$. On peut lire que $3 \times \Delta \lambda = 0,5$ nm, donc $0,5$ nm = $3 \times 2 \times L = 6L$, soit $L = 0,083$ nm.

Dualité onde-particule

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
<ul style="list-style-type: none"> – Photon et onde lumineuse. – Particule matérielle et onde de matière ; relation de de Broglie. – Interférences photon par photon, particule de matière par particule de matière. 	<ul style="list-style-type: none"> – Savoir que la lumière présente des aspects ondulatoire et particulaire. – Extraire et exploiter des informations sur les ondes de matière et sur la dualité onde-particule. – Connaître et utiliser la relation $p = h/\lambda$. – Identifier des situations physiques où le caractère ondulatoire de la matière est significatif. – Extraire et exploiter des informations sur les phénomènes quantiques pour mettre en évidence leur aspect probabiliste des phénomènes quantiques.

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Savoir que la lumière présente des aspects ondulatoire et particulaire.
2. Connaître et utiliser la relation $p = h/\lambda$.
3. Appréhender l'aspect probabiliste des phénomènes quantiques.

Évaluation diagnostique p. 418

SITUATION 1

Les concepts d'onde et de particule sont les deux concepts de la physique classique. Toute la physique du XIX^e siècle est bâtie sur des théories particulières et ondulatoires de la matière/rayonnement. La physique classique se réfère toujours à ces deux concepts connus pour interpréter la nature des objets qui l'entoure.

Cette situation présente un skieur qui descend en zigzag une piste enneigée. La trace laissée derrière le skieur ressemble beaucoup à la photo d'une onde qui se propagerait. Pour autant peut-on affirmer que le skieur a un comportement ondulatoire ?

Non pour plusieurs raisons :

- la trace correspond à la trajectoire du skieur : la trajectoire est un concept physique liée à un comportement particulaire ;
- une onde qui se propage ne déplace pas de matière.

Ce n'est pas le cas ici, le skieur transporte de la matière. L'activité 1 met en parallèle le comportement de la lumière et les théories scientifiques qui interprètent

les comportements. La lumière manifeste des comportements tantôt ondulatoires, tantôt particuliers. Peut-on pour autant lui associer une nature particulière dans certains cas et une nature ondulatoire dans d'autres cas ? Le terme de dualité-onde corpuscule est introduit pour lever cette difficulté.

SITUATION 2

Cette situation de la métaphore du cylindre n'est pas sans rappeler le comportement de la lumière déjà évoquée dans l'activité 1. L'objectif est de faire réfléchir les élèves sur l'interprétation des comportements des objets physiques. Deux comportements différents suivant l'étude faite pour un même objet, peuvent-ils être interprétés par deux natures différentes ?

L'activité 2 introduit l'hypothèse de de Broglie. Cette hypothèse permet d'unifier le double comportement des objets microscopiques et d'apporter une nouvelle représentation des objets physiques autre que les concepts classiques d'onde et de particule.

Les particules du monde microscopique ont un double comportement à l'image de la lumière. La longueur d'onde de matière $\lambda = h/p$ est introduite. L'étude met en évidence les situations où le comportement ondulatoire des particules est significatif.

SITUATION 3

Pour beaucoup d'élèves, il y a confusion entre phénomènes probabilistes et phénomènes chaotiques, si bien qu'ils considèrent que rien ne peut être exploité

des phénomènes probabilistes. L'aspect probabiliste de la radioactivité a déjà été traité en classe de Première. La situation 3 représente la courbe de répartition des QI de la population mondiale. La courbe ne nous renseigne pas sur le QI d'un individu pris au hasard mais la multiplication de l'expérience nous apporte des informations sur la répartition et donc sur la probabilité d'avoir un individu de QI donné. L'étude de l'expérience seule n'a pas de sens, seule l'étude du comportement collectif ou la multiplication des expériences permet d'extraire des informations des phénomènes probabilistes. L'**activité 3** a pour objectif de montrer que les particules microscopiques ont un comportement probabiliste. La distribution des impacts lors d'une expérience d'interférences particules par particules montre que la distribution des impacts n'est pas chaotique mais aléatoire. Des informations peuvent donc être extraites de la multiplication des jets de particules.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

Lumière : onde ou particule ?

p. 420

- On dessine un faisceau de lumière diaphragmé et non diffracté.
 - Non, la lumière est diffractée dans l'expérience 1.
- La dimension des bateaux est très petite devant la longueur d'onde de l'onde mécanique représentée. La présence des bateaux n'influence pas la longueur d'onde de la houle.
 - Non, car la longueur d'onde du photon est modifiée par la rencontre avec l'électron.
- Huygens et Maxwell ont interprété le comportement de la lumière par sa nature ondulatoire. Newton et Einstein ont interprété le comportement de la lumière par sa nature particulaire.
 - Suivant l'étude de la lumière qui est menée, le comportement de celle-ci est différent. La lumière se comporte tantôt comme une onde tantôt comme une particule. Sa nature est donc difficile à définir à l'aide des concepts classiques d'ondes et de particules.
- Le comportement de la lumière dépend de l'expérience réalisée. Sa nature est dite « duale ».

ACTIVITÉ 2

Une nouvelle représentation

p. 421

- $\lambda = h/(m \cdot v) = 1/(1,0 \times 10^{-3} \times 2,0) = 5 \times 10^2 \text{ m}$.
 - λ est du même ordre de grandeur (10^2 m) que la fente. Les papillons vont se répartir par paquets plus ou moins denses après la fente à l'image d'une figure de diffraction observée avec la lumière.
 - $\lambda = 3,3 \times 10^{-31} \text{ m}$. Pas de phénomène ondulatoire mais un comportement particulaire.

d. La constante de Planck.

e.

Objet	Masse (kg)	Vitesse ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Taille de l'ouverture a	$p \cdot a/h = a/\lambda$
Nuage de papillons	$1,0 \times 10^{-3}$	2,0	1,0 m	$3,0 \times 10^{30}$
Une foule de manifestants	70	1,0	5,0 m	$5,3 \times 10^{35}$
Nuage d'atomes « refroidis »	$3,34 \times 10^{-26}$	2,0	5,0 nm	0,50
Nuage d'électrons	$9,0 \times 10^{-31}$	500	1,0 μm	0,67

- Si T diminue, v aussi, donc la longueur d'onde de matière augmente. Il est donc plus facile d'observer des phénomènes ondulatoires.
- p est lié au concept de particule et λ au concept d'onde. La formule permet de lier ces deux concepts antagonistes.
- Le rapport a/λ n'est pas du même ordre de grandeur.
- Lorsque le rapport a/λ est du même ordre de grandeur, les phénomènes ondulatoires des objets se manifestent.

ACTIVITÉ 3

Aléatoire... mais pas chaotique

p. 422

- De façon chaotique.
 - De façon ordonnée.
 - La désintégration de noyaux radioactifs.
- Les parties les plus lumineuses correspondent aux zones où la probabilité est la plus importante.
- On peut prévoir que sur certaines zones, la probabilité de l'impact est quasi nulle et sur d'autres zones plus importante, rien d'autre. La connaissance de paramètres dynamiques et cinématiques est valable pour anticiper la trajectoire de particules.
 - Probabilité maximale : zones claires. Probabilité minimale : zones sombres.
- On tire des renseignements du comportement collectif ou de la multiplication de l'expérience individuelle.
 - La multiplication de l'expérience individuelle ou le comportement collectif d'objets identiques permettent d'extraire dans le cas de phénomènes aléatoires des informations probabilistes. L'analogie peut être faite avec la radioactivité.

ACTIVITÉ 4

Un modèle semi-quantique de l'atome

p. 423

- $2\pi \cdot r_n = n \cdot \lambda$.
 - $v_n = h/(m \cdot \lambda) = h/(m \cdot (2\pi \cdot r_n)/n) = (n \cdot h)/(2\pi \cdot m \cdot r_n)$.
- $F = (k \cdot e^2)/r_n^2$.
 - La seconde loi de Newton permet d'obtenir $F = m \cdot a = m \cdot v^2/r = (k \cdot e^2)/r^2$. Ainsi $v = ((k \cdot e^2)/(r_n \cdot m))^{1/2}$.

3. a. $(1) = (2)$, donc $v_n = (n \cdot h)/(2\pi \cdot m \cdot r_n)$
 $= ((k \cdot e^2)/(r_n \cdot m))^{1/2}$,

$r_n = (n^2 \cdot h^2)/(4\pi^2 \cdot m \cdot k \cdot e^2)$.

b. Oui, r_n est quantifié.

c. $v_n = (2\pi \cdot k \cdot e^2)/(n \cdot h)$.

4. a. L'énergie totale est la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle qui dérive de la force électrique.

b. Il suffit de remplacer v_n et r_n dans l'expression de l'énergie pour retrouver l'expression quantifiée de l'énergie.

5. a. $E_1 = -E_0/1^2 = -13,6 \text{ eV}$, il suffit de vérifier pour quelques valeurs de n que $E_n = -13,6/n^2$.

b. Le modèle est dit semi-quantique, car il utilise des outils de la mécanique classique et de la mécanique « ondulatoire » prémices de la mécanique quantique.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : Savoir que la lumière présente des aspects ondulatoire et particulaire

1. 1. *Vrai.*

2. *Vrai.*

3. *Faux.* La lumière possède deux comportements : ondulatoire et particulaire.

4. *Vrai.* C'est l'expérience qui oriente le comportement de la lumière.

2. 1. Figure de diffraction obtenue avec un écran percé d'un trou.

2. Ce comportement peut s'interpréter par une nature ondulatoire de la source.

3. 1. Nature ondulatoire.

2. Elle s'étend de toutes parts. Quand il en vient de différents endroits, même de tout opposés, elles se traversent l'une l'autre sans s'empêcher.

3. Le comportement d'une balle ou d'une flèche est très différent de celui de la lumière et est incompatible avec les deux comportements cités dans la question 2.

4. 1. $E = h \cdot \nu$.

2. ν a diminué, l'énergie du photon X aussi.

3. L'énergie est transférée à l'électron.

4. On peut interpréter cette expérience comme une collision entre deux particules.

5. Le comportement particulaire est mis en évidence.

COMPÉTENCE 2 : Connaître et utiliser la relation $p = h/\lambda$

6. 1. *Faux.* Le comportement ondulatoire des particules ne peut s'observer que dans certaines conditions.

2. *Vrai.*

3. *Vrai.*

7. 1. b et d.

2. a, c et d.

8. 1. L'aspect granulaire de la photo correspond à une manifestation du comportement particulaire. Les franges obtenues correspondent à une manifestation du comportement ondulatoire. L'électron se comporte comme une onde et une particule en même temps.

2. La quantité de mouvement fait référence au concept de particule, alors que la longueur d'onde fait référence au concept d'onde.

9. a. $\lambda = h/(m \cdot \nu) = 3,6 \text{ }\mu\text{m}$.

b. $\lambda = 12 \text{ nm}$.

c. $\lambda = h/p = 2,8 \text{ pm}$.

10. 1. $\lambda = 6,63 \times 10^{-34}/(0,5 \times 10^{-3} \times 250) = 5 \times 10^{-33} \text{ m}$.

2. λ très inférieure aux dimensions de l'obstacle. Comportement ondulatoire imperceptible.

11 Le plus gros objet diffracté

La molécule de fullerène C_{60} est constituée de soixante atomes de carbone. Un faisceau de molécules C_{60} émis d'un four passe à travers des grilles en silicone de largeur 50 nm à une vitesse de $200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Il est difficile de fabriquer des grilles qui fonctionnent avec d'aussi petites longueurs d'onde.

1. Quelle est la longueur d'onde de matière des molécules de C_{60} utilisées ?

$\lambda = 6,63 \times 10^{-34}/(60 \times 2 \times 10^{-26} \times 200) = 2,8 \text{ pm}$.

2. Pourquoi est-il si difficile de réaliser des grilles qui diffractent les atomes de C_{60} ?

Pour que l'aspect ondulatoire se manifeste, il faut que l'ordre de grandeur de l'obstacle soit le plus proche possible de la longueur d'onde de matière. Celle-ci est extrêmement petite.

COMPÉTENCE 3 : Appréhender l'aspect probabiliste des phénomènes quantiques

13. 1. *Faux.* On peut anticiper la probabilité de leur impact à un endroit donné.

2. *Faux.* Le concept de trajectoire ne peut s'appliquer qu'aux particules.

14. 1. a et b.

2. b et c.

15. 1. a. Cette courbe correspond à une distribution de particules.

b. C'est le comportement que l'on observerait avec des billes. Le comportement est donc « classique ».

2. Une figure de diffraction (tache d'Airy) aurait pu être observée si le caractère ondulatoire avait été dominant. (Longueur d'onde de matière du même ordre de grandeur que les dimensions du trou.)

3. Lorsque l'aspect ondulatoire domine sur l'aspect particulaire.

16 1. Les zones sombres correspondent aux zones où la probabilité de l'impact d'un photon est quasi nulle. Les zones les plus lumineuses correspondent aux zones où la probabilité est maximale.

2. La quantité de photons par unité de temps est très importante.

17 Les lionnes se répartissent aux endroits où la probabilité de présence des gazelles n'est pas nulle.

18 1. et 2. C'est une figure de diffraction dite tache d'Airy (voir figure 1, p. 224). Les creux de la courbe correspondent aux zones où la probabilité de l'impact d'un photon est plus faible.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

19 1. C'est une figure d'interférences. C'est une manifestation d'un comportement ondulatoire.

2. Si la vitesse des neutrons augmente, la longueur d'onde diminue.

3. Le comportement devient particulaire ($\lambda \ll a$ largeur des fentes), il y a disparition des interférences (voir courbe de l'exercice 15, distribution particulaire).

20 1. D'après la relation $\theta = \lambda/a$, on en déduit que les particules responsables de la figure ont une longueur d'onde plus petite que celles qui passent par **b**. D'après la relation de de Broglie, la vitesse des particules **a** est plus importante.

2. Idem pour la longueur d'onde. D'après la relation de de Broglie, la masse des particules **a** est plus élevée.

21 1. a. L'onde est peu affectée par la rencontre d'objets de dimension très inférieure à sa longueur d'onde.
b. La longueur d'onde la plus petite utilisable avec un microscope optique est 200 nm. On ne pourra pas distinguer nettement des détails beaucoup plus petits que la longueur d'onde de 200 nm, car l'onde ne sera pas affectée par les objets rencontrés.

2. **a.** Pour atteindre une résolution de 0,2 nm, il faut des longueurs d'onde de matière de l'ordre du dixième de nanomètre.

$$\text{b. } v = h/(m \cdot \lambda) = 6,63 \times 10^{-34} / (9,11 \times 10^{-31} \times 0,2 \times 10^{-9}) \\ = 4 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

22 1. a. L'onde est peu affectée par la rencontre d'objets de dimension très inférieure à sa longueur d'onde.
b. Pour observer nettement les détails de la protéine, il faut des longueurs d'onde inférieures au dixième de micromètre (dixième de la dimension de la protéine), soit un ordre de grandeur de 10^2 nm. Cette valeur est inférieure aux longueurs d'onde utilisées avec le microscope optique.

2. **a.** $\lambda \approx 10^2$ nm.

$$\text{b. } v = h/(m_e \cdot \lambda) \\ = 6,63 \times 10^{-34} / (9,11 \times 10^{-31} \times 10^2 \times 10^{-9}) \\ v = 7 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

23 1. C'est une distribution des impacts qui est caractéristique d'un comportement ondulatoire.

2. **a.** Largeur $d = 2 \times 10^2 \mu\text{m}$.

$$\text{b. } \theta \approx d/(2 \cdot D) = 2 \times 10^{-4} / (2 \times 5,0) = 2 \times 10^{-5} \text{ rad}$$

$$\text{c. } \theta \approx \lambda/a \approx d/(2 \cdot D)$$

$$\text{soit } \lambda = \theta \cdot a = 2 \times 10^{-5} \times 93 \times 10^{-6} = 2 \text{ nm}.$$

$$\text{d. } v = h/(m \cdot \lambda) = 2 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

3. **a.** Non, le phénomène est probabiliste.

$$\text{b. } d_{\text{probabilité}} \approx 1 \times 10^2 \mu\text{m}.$$

c. Au centre de la tache centrale.

4. **a.** Si la vitesse diminue, la longueur d'onde augmente et la largeur de la tache centrale augmente ($\theta \approx \lambda/a$).

b. Le nombre d'impacts étant constant, ils sont davantage répartis sur l'écran, la probabilité d'un impact au centre diminue.

24 1. La notion d'interférences constructives est caractéristique d'un comportement ondulatoire. Ce comportement avait été prédit par de Broglie trois ans avant cette expérience.

2. **a.** Le pic est obtenu pour une énergie cinétique :

$$E_c = 55 \text{ eV} = 8,8 \times 10^{-18} \text{ J}$$

$$\text{soit } v = ((2 \cdot E)/m)^{1/2} = 4,4 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$\text{b. } \lambda = h/(m \cdot v) = 1,65 \times 10^{-10} \text{ m}.$$

3. **a.** Relation de trigonométrie :

$$\sin \varphi = (\text{différence de « chemin »})/d.$$

Pour que les interférences soient constructives il faut que les ondes de matière soient en phase, soit une différence de « chemin » $= k \cdot \lambda = d \cdot \sin \varphi$.

b. La plus petite énergie cinétique implique la plus grande longueur d'onde qui produit des interférences constructives. Donc $k = 1$.

c. Avec l'énergie cinétique la plus faible, λ est la plus élevée pour obtenir des interférences constructives, ainsi $k = 1$. On a $\lambda = d \cdot \sin \varphi$, donc :

$$d = \lambda/\sin \varphi = 1,65 \times 10^{-10} / \sin 50 \approx 0,21 \text{ nm},$$

ce qui correspond à la distance interatomique du cristal de nickel.

EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

25 1. a. $p = h/\lambda = 1,3 \times 10^{-27} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

b. $p = m \cdot v = 5,4 \times 10^{-28} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

c. Les deux quantités de mouvement ont toutes les deux le même ordre de grandeur.

2. a. La trajectoire en pointillés de l'électron va être modifiée par la collision avec le photon.

b. Si on augmente la longueur d'onde du photon, on diminue la quantité de mouvement de celui-ci, donc l'impact sur la trajectoire de l'électron.

c. La longueur d'onde de la lumière devenant trop grande devant les dimensions de l'obstacle, elle ne sera pas affectée par la rencontre de l'électron.

3. Plus la précision de la position est importante, plus Δx est petit. Cette précision implique une longueur d'onde petite, donc une grande quantité de mouvement pour la lumière. Plus la quantité de mouvement de la lumière est importante, plus on va modifier la valeur de la vitesse (donc p) de l'électron. Ainsi, Δx petit implique Δp grand et même raisonnement inverse.

4. Il est impossible d'accéder à la position de la particule sans modifier sa trajectoire.

1 1. a. $\Phi = \Delta T/R$.

b. Φ en W, ΔT en K ou en °C et R en $K \cdot W^{-1}$.

2. Le choix des matériaux est pertinent car les résistances thermiques des matériaux entre le circuit de chauffage et les fondations sont importantes et celles des ceux entre le circuit de chauffage et l'appartement sont faibles.

3. a. L'air à proximité de la surface du revêtement s'échauffe et se dilate de telle sorte qu'il devient moins dense et se déplace en s'élevant : c'est le phénomène de convection.

b. $T_a < T_s < T_e$ donc $20^\circ C < T_s < 30^\circ C$.

4. a. $R_{sup} = R_{rev} + R_{mor} + R_{conv}$.

A.N. : $R_{sup} = 6,25 \times 10^{-5} + 6,25 \times 10^{-4} + 1,04 \times 10^{-3}$
 $= 1,73 \times 10^{-3} K \cdot W^{-1}$.

b. $\Phi_1 = \Delta T_1/R_{conv}$

A.N. : $\Phi_1 = (30 - 20)/1,73 \times 10^{-3} = 5,8 kW$.

5. $\Phi_1 = (T_s - T_a)/R_{conv}$ donc :

$$T_s = T_a + R_{conv} \cdot \Phi_1$$

A.N. : $T_s = 20 + 1,04 \times 10^{-3} \times 5\,800 = 26^\circ C$.

Ce résultat est en accord avec l'encadrement de **2.b.**

6. a. $R_{inf} = R_{iso} + R_{béton}$.

A.N. : $R_{inf} = 7,81 \times 10^{-3} + 1,33 \times 10^{-3} = 9,14 \times 10^{-3} K \cdot W^{-1}$.

b. $\Phi_2 = \Delta T_2/R_{inf}$

A.N. : $\Phi_2 = (30 - 10)/9,14 \times 10^{-3} = 2,2 kW$.

7. $P_c = \Phi_1 + \Phi_2$.

2 A. 1. $\Delta U = C_p \cdot \Delta T = m_{eau} \cdot c_{eau} \cdot (T_c - T_f)$
 $= \rho_{eau} \cdot V \cdot c_{eau} \cdot (T_c - T_f)$.

A.N. : $\Delta U = 300 \times 4\,180 \times (55 - 15) = 5,0 \times 10^7 J$.

$1 j = 24 h = 24 \times 3\,600 = 86\,400 s$,

donc $P = \Delta U/\Delta t = 5,0 \times 10^7/86\,400 = 580 W$.

$\Delta E = P \cdot \Delta t = 580 \times 24 = 14 kWh$.

2. $\Delta E = \eta \cdot \Delta E_{sol}$ donc $\Delta E_{sol} = \Delta E/\eta$.

A.N. : $\Delta E_{sol} = 14/0,40 = 35 kWh$.

3. a. $\Delta e_{max} = 6 kWh \cdot m^{-2}$ les mois ensoleillés.

$S = \Delta E_{sol}/\Delta e_{max}$

A.N. : $S = 35/6 = 6 m^2$.

b. Le capteur solaire a une dimension de $8 m^2$.

Donc $\Delta E_{sol} = \Delta e_{max} \cdot S = 6 \times 8 = 48 kWh$.

Donc $\Delta E = \eta \cdot \Delta E_{sol} = 0,4 \times 48 = 19,2 kWh$.

Donc $P = \Delta E/\Delta t = 19\,200/24 = 800 W$.

Donc $\Delta U = P \cdot \Delta t = 800 \times 86\,400 = 6,9 \times 10^7 J$.

Donc $T_c = \Delta U/\rho_{eau} \cdot V \cdot c_{eau} + T_f$
 $= 6,9 \times 10^7/(300 \times 4\,180) + 15 = 70^\circ C$.

B. $\Phi = \Delta T/R$.

A.N. : $\Phi = (55 - 25)/(1,82 \times 10^{-1}) = 160 W$.

3 1. a. La variation d'énergie macroscopique mise en œuvre est une variation d'énergie cinétique (variation de vitesse).

b. $\Delta E_c = E_{cf} - E_{ci} = (1/2) \cdot M \cdot v_f^2 - (1/2) \cdot M \cdot v_i^2$
 $= 2,7 \times 10^5 - 8,8 \times 10^5 = -6,1 \times 10^5 J$.

2. a. Le travail des forces de frottement est à l'origine de cet échauffement.

b. Si on considère qu'il n'y aucun autre transfert thermique, on peut écrire que $\Delta U = W = -\Delta E_c = 6,1 \times 10^5 J$.

3. a. $m_{acier} = \rho_{acier} \cdot 4 \pi \cdot (D/2)^2 \cdot e$
 $= 7\,800 \times 4 \pi \times (0,25/2)^2 \times 0,010 = 15,4 kg$.

b. $\Delta U = C_p \cdot \Delta T = m_{acier} \cdot c_p \cdot (T_f - T_i)$, donc :

$$T_f = (\Delta U/m_{acier} \cdot c_p) + T_i = (6,1 \times 10^5/15,4 \times 460) + 40 = 126^\circ C$$

c. En réalité, une mesure effectuée sur les disques montre que la température finale des disques n'est que de $100^\circ C$. L'écart constaté entre la valeur calculée et celle mesurée est l'existence d'un transfert thermique vers l'air environnant.

4 A. 1. $W_e = U \cdot I \cdot \Delta t$.

$U = R \cdot I$ donc $W_e = R \cdot I^2 \cdot \Delta t$.

2. $Q = (m \cdot c + C) \cdot \Delta T$.

3. Si l'enceinte du calorimètre est parfaitement calorifugée, il n'y a pas d'échanges de chaleur entre le calorimètre et l'extérieur. Donc $W_e = Q$.

4. a. $R \cdot I^2 \cdot \Delta t = (m \cdot c + C) \cdot \Delta T$

donc $C = (R \cdot I^2 \cdot \Delta t/\Delta T) - m \cdot c$.

b. $C = ((40 \times 0,75^2 \times 8 \times 60)/12) - 0,200 \times 4\,180$
 $= 64 J \cdot K^{-1}$.

B. 1. Lors de la chauffe :

a. l'agitation moléculaire augmente ;

b. $\Delta T = 41,2 - 22 = 19,2^\circ C$.

2. Les échanges d'énergie avec l'extérieur ne sont pas nuls. La température du calorimètre décroît lentement dès que le système de chauffage est arrêté.

3. $R \cdot I^2 \cdot \Delta t = (m \cdot c_{CPG} + C) \cdot \Delta T$

$c_{CPG} = [(R \cdot I^2 \cdot \Delta t/\Delta T) - C]/m$.

4. $c_{CPG} = [(40 \times 0,75^2 \times 8 \times 60/19,2) - 64]/0,200$
 $= 2,49 kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$.

5. Il est intéressant que la capacité thermique d'un liquide de refroidissement soit très élevée car la quantité d'énergie à évacuer par le liquide est proportionnelle à la capacité thermique massique du liquide de refroidissement.

5 1. a. Dans un atome dans un état non excité – état stable – les électrons se répartissent sur des niveaux d'énergie bien déterminés. Si on apporte de l'énergie,

l'atome passe dans un état excité où les électrons accèdent à des niveaux supérieurs instables.

b. Quand un électron revient d'un état d'énergie E_i à un état d'énergie E_f (avec $E_i > E_f$), il restitue la différence d'énergie $\Delta E = E_i - E_f$ sous la forme d'une onde électromagnétique de fréquence ν donnée par :

$$\Delta E = E_i - E_f = h \cdot \nu \text{ avec } h \text{ constante de Planck.}$$

2. Dans une horloge atomique, la transition entre deux niveaux hyperfins d'un atome de césium 133 correspond à une onde de fréquence $\nu = 9\,192\,631\,770$ Hz.

a. $\lambda = c/\nu$.

A.N. : $\lambda = 3$ cm.

b. Il s'agit d'une onde très courte (dite centimétrique) comme celles utilisées dans les radars.

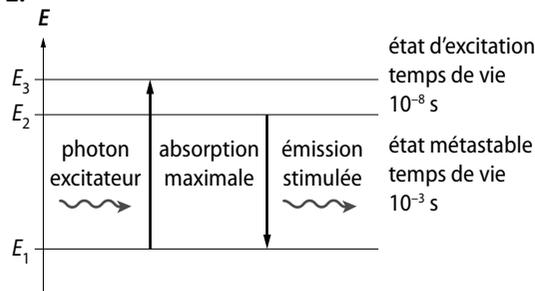
3. Les atomes sont en mouvement sous l'action de l'agitation thermique.

4. L'énergie interne du gaz obtenu est essentiellement due à l'énergie cinétique des atomes qui prédomine.

6 1. La fréquence d'émission d'un laser est imposée par :

réponse **b.** : les transferts quantiques d'énergie qui ont lieu dans le rubis.

2.



3. On donne $E_3 - E_1 = 2,26$ eV et $E_3 - E_2 = 0,55$ eV.

a. $E_3 - E_2 = h \cdot c/\lambda$.

Donc $\lambda = h \cdot c/(E_3 - E_2)$.

$$\text{A.N. : } \lambda = 6,62 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8 / 0,55 \times 10^{-19} = 2\,800 \text{ nm.}$$

Un photon d'énergie $E_3 - E_2$ ne peut induire le rayonnement laser car la longueur d'onde correspondante n'est pas dans le visible.

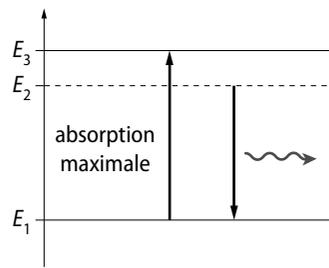
b. $E_3 - E_1 = h \cdot c/\lambda$.

Donc $\lambda = h \cdot c/(E_3 - E_1)$.

$$\text{A.N. : } \lambda = 6,62 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8 / (2,26 \times 10^{-19}) = 690 \times 10^{-9}.$$

La longueur d'onde du rayonnement émis par ce laser est $\lambda = 690$ nm.

7 A. 1. E



2. a. Lorsque qu'un photon d'énergie $E_2 - E_1$ rencontre un ion dans l'état excité E_2 , cet ion peut retrouver l'état d'énergie plus stable E_1 en émettant un photon de même énergie $E_2 - E_1$. Ce mode d'émission est appelé l'émission stimulée.

b. L'émission stimulée produit des photons qui ont même énergie et même direction que ceux incidents.

3. L'émission spontanée.

$$4. E_3 - E_1 = \Delta E_{\text{absorption}} = h \cdot c/\lambda_{\text{absorption}}$$

$$\text{A.N. : } E_3 - E_1 = 6,62 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8 / (980 \times 10^{-9}) = 2,03 \times 10^{-19} \text{ J.}$$

5. La longueur d'onde du rayonnement laser vaut 2 936 nm donc d'ordre de grandeur 10^{-6} m dans l'émission est dans le domaine des IR.

$$6. E_2 - E_1 = \Delta E_{\text{émission}} = h \cdot c/\lambda_{\text{émission}}$$

$$\text{A.N. : } E_2 - E_1 = 6,62 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8 / (2\,980 \times 10^{-9}) = 6,67 \times 10^{-20} \text{ J.}$$

7. $\Delta E_{\text{émission}} < \Delta E_{\text{absorption}}$ donc toute l'énergie reçue n'est pas émise : il faut donc un système de refroidissement pour ce laser pour évacuer la différence d'énergie.

B. 1. Nombre de photons émis par impulsion :

$$N = \Delta E_{\text{imp}} / \Delta E_{\text{photon}}$$

$$\text{A.N. : } N = 0,300 / (6,76 \times 10^{-20}) = 4,44 \times 10^{18}.$$

2. Puissance lumineuse d'émission d'une impulsion :

$$P_{\text{lum}} = \Delta E_{\text{imp}} / \tau.$$

$$\text{A.N. : } P_{\text{lum}} = 0,300 / (0,20 \times 10^{-3}) = 1,5 \times 10^3 \text{ J.}$$

3. $I = P/S$.

$$S = \pi \cdot r^2 \text{ donc } I = P/\pi \cdot r^2.$$

$$\text{A.N. : } I = 1,5 \times 10^3 / \pi \times (0,50 \times 10^{-3})^2 = 1,9 \times 10^9 \text{ W} \cdot \text{m}^2.$$

4. a. f a la dimension inverse d'un temps : $[f] = T^{-1}$.

Δt a la dimension d'un temps.

Donc $f \cdot \Delta t$ n'a pas de dimension.

Donc ΔE_{ray} a la dimension de ΔE_{imp} donc d'une énergie.

$$b. \Delta E_{\text{ray}} = f \cdot \Delta t \cdot \Delta E_{\text{imp}}$$

$$\Delta E_{\text{ray}} = 10 \times 4,5 \times 0,300 = 14 \text{ J.}$$

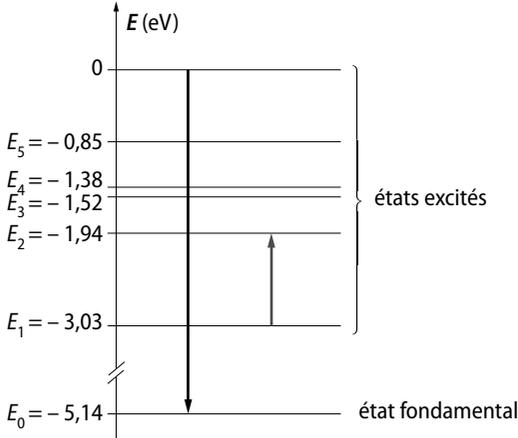
8 A. 1. Domaine du l'UV : 330,3 nm.

Domaine du visible : 548,8 nm ; doublet 589,0/589,6 nm ; 615,4 nm.

Domaine de l'IR : 819,5 nm ; 1 138,2 nm.

2. Cette lumière est constituée de plusieurs longueurs d'onde, donc c'est une lumière polychromatique.

B. 1.



2. L'énergie et donc les variations d'énergie sont quantifiées.

$\Delta E = h \cdot c / \lambda$ donc comme ΔE est quantifiée, on a des raies d'émissions correspondant aux longueurs d'onde λ correspondante, d'où la discontinuité du spectre d'émission d'une lampe à vapeur de sodium.

3. a. $\Delta E = h \cdot c / \lambda = 6,62 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8 / (589 \times 10^{-9}) = 3,31 \times 10^{-19} \text{ J} = 5,30 \text{ eV}.$

b. Voir diagramme (en noir).

C. 1. $|E_2 - E_1| = 1,09 \text{ eV}$, donc l'atome de sodium à l'état E_1 absorbera cette énergie pour atteindre le niveau E_2 .

2. Voir diagramme (en gris).

La raie associée à cette transition est une raie d'absorption.

9 1. a. Relation de de Broglie : $p = h / \lambda$.

p est la quantité de mouvement de la particule et concerne le comportement corpusculaire.

λ est la longueur d'onde de l'onde de matière.

La relation de de Broglie relie donc le comportement corpusculaire au comportement ondulatoire pour une particule.

b. h est en $\text{J} \cdot \text{s}$ donc h a la dimension d'un travail fois un temps : $[h] = [W] \times T$.

Un travail a la dimension d'une force fois une longueur : $[W] = [F] \times L$.

Une force a la dimension d'une masse fois une vitesse sur un temps (2^e loi de Newton) : $[F] = M \times [v] / T$.

Une vitesse a la dimension d'une longueur sur un temps : $[v] = L / T$.

Donc $[h] = (M \times L \times L \times T) / (T \times T) = M \times L^2 / T$.

p a la dimension d'une masse fois une vitesse :

$$[p] = M \times [v]$$

Une vitesse a la dimension d'une longueur sur un temps : $[v] = L / T$.

Donc $[p] = M \times L / T$.

Donc $[h] / [p] = (M \times L^2 / T) / (M \times L / T) = L$.

Donc la quantité h/p a la dimension d'une longueur.

2. $p = h / \lambda$ donc $\lambda = h / p$.

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2.$$

$$p = m \cdot v \text{ donc } p^2 = m^2 \cdot v^2 = 2 \cdot m \cdot E_c$$

$$\text{donc } \lambda = h / p = h / (2 \cdot m \cdot E_c)^{1/2}.$$

A.N. :

$$\lambda = 6,62 \times 10^{-34} / (2 \times 9,109 \times 10^{-31} \times 54 \times 1,60 \times 10^{-19})^{1/2} = 1,67 \times 10^{-10} \text{ m}.$$

3. a. $\lambda = h / p = h / (2 \cdot m \cdot E_c)^{1/2}$.

$$\text{A.N. : } v = 130 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} = 200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \times 800 \times 200^2 = 1,6 \times 10^7 \text{ J}.$$

$$\lambda = 6,62 \times 10^{-34} / (2 \times 800 \times 1,6 \times 10^7)^{1/2} = 4,1 \times 10^{-39} \text{ m}.$$

b. On n'observe pas de comportement ondulatoire pour une voiture car la longueur d'onde est extrêmement petite devant les dimensions des obstacles (de l'ordre du mètre) qui sont dans l'environnement de la voiture.

Résistance thermique et températures

1. Par définition, $\Delta T = T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}$.

On mesure T_{int} directement en relevant la valeur de la température affichée à l'écran de l'ordinateur (le capteur de température, présent à l'intérieur de l'enceinte, est relié *via* une interface à l'ordinateur qui dispose d'un logiciel de traitement de mesures).

On mesure T_{ext} en utilisant un thermomètre placé à l'air libre à l'extérieur de l'enceinte.

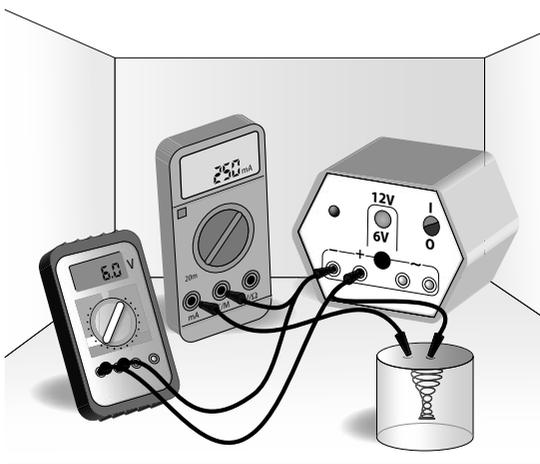
2. a. Le flux thermique Φ est la puissance perdue par l'enceinte.

Quand la température T_{int} se stabilise, la valeur du flux est égale à la puissance électrique de la résistance chauffante.

On détermine cette puissance électrique P en mesurant la valeur de la tension U d'alimentation de la résistance chauffante et l'intensité I la traversant.

À l'équilibre thermique, on peut écrire $\Phi = P = U \cdot I$.

b.



3. a. Il faut attendre que la température à l'intérieur de l'enceinte se stabilise.

b. Quand la température se stabilise, on mesure U et I .

Exemple : $U = 6,0 \text{ V}$; $I = 0,25 \text{ A}$.

4. $P = U \cdot I$.

$\Phi = \Delta T/R$ donc $R = \Delta T/\Phi = \Delta T/(U \cdot I)$.

Exemple : $\Delta T = T_{\text{int}} - T_{\text{ext}} = 36 - 21 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$.

$P = U \cdot I = 6,0 \times 0,25 = 1,5 \text{ W}$.

Donc $R = 15/1,5 = 10 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$.

5. a. Quand on enveloppe l'enceinte du matériau isolant prévu, la température T_{int} augmente pour une même puissance électrique.

Exemple : $T_{\text{int}2} = 44,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

b. On montre $R = \Delta T/\Phi = \Delta T/(U \cdot I)$ augmente.

Exemple : $\Delta T_2 = T_{\text{int}2} - T_{\text{ext}} = 44,5 - 21,0 = 22,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

$P = U \cdot I = 6,0 \times 0,25 = 1,5 \text{ W}$.

Donc $R_2 = 22,5/1,5 = 15 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$.

c. Ces résultats sont en accord avec la théorie.

$R = \Delta T/\Phi = \Delta T/(U \cdot I)$.

À puissance constante, si ΔT augmente, alors R augmente.

Enjeux énergétiques

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
<ul style="list-style-type: none"> – Nouvelles chaînes énergétiques. – Économies d'énergie. 	<ul style="list-style-type: none"> – Extraire et exploiter des informations sur des réalisations ou des projets scientifiques répondant à des problématiques énergétiques contemporaines. – Faire un bilan énergétique dans les domaines de l'habitat ou du transport. – Argumenter sur des solutions permettant de réaliser des économies d'énergie.

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Identifier des problématiques énergétiques contemporaines.
2. Faire un bilan énergétique dans les domaines de l'habitat ou du transport.
3. Argumenter sur des solutions permettant de réaliser des économies d'énergie.

Évaluation diagnostique p. 440

SITUATION 1

L'objectif pédagogique de la situation proposée est de réinvestir la notion d'énergie renouvelable étudiée en classe de Première S.

Les énergies renouvelables proviennent de ressources qui ne s'épuisent pas lorsqu'elles sont exploitées. Elles sont rapidement disponibles et régénérables. Exemples : géothermie, solaire, éolien, hydraulique, biomasse. Cette activité fait le lien avec l'**activité 1** qui présente des problématiques énergétiques contemporaines.

SITUATION 2

L'objectif pédagogique de la situation proposée est d'introduire la notion de bilan énergétique global du « puits à la roue ».

La répartition des modes de production de l'électricité varie selon les trois pays. Pour effectuer un bilan complet, il faut aussi tenir compte des rendements énergétiques du « puits au réservoir ».

Cette activité fait le lien avec l'**activité 2** qui présente le bilan énergétique d'une voiture selon une démarche d'investigation.

SITUATION 3

L'objectif pédagogique de la situation proposée est d'appréhender un moyen d'économie d'énergie. On pourrait utiliser la « chaleur » perdue pour produire de l'eau chaude sanitaire ou chauffer des résidences, des usines (en pratique, les centrales nucléaires sont plutôt isolées des zones résidentielles).

Cette activité fait le lien avec l'**activité 3** qui présente des moyens d'économie d'énergie dans l'habitat dont la cogénération.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

Les énergies de demain p. 442

1. La consommation énergie mondiale croît fortement (+ 79 % entre 1973 et 2008).
2. a. Renouvelable (biomasse, géothermie, solaire, hydraulique) ; non renouvelable (pétrole, gaz naturel, charbon, nucléaire).
b. Renouvelable (1,590 Gtep soit 12,9 %) ; non renouvelable (10,76 Gtep soit 87,1 %).
3. a. Hydrocarbures : gaz, pétrole et charbon (10,04 Gtep soit 81,4 %).
b. La ressource en hydrocarbures est limitée, leur combustion rejette des gaz à effet de serre.

c. Les réacteurs à fission nucléaire n'émettent pas de gaz à effet de serre, la ressource en uranium 235 est abondante à condition de développer la technologie des surgénérateurs. Mais la fission nucléaire produit des déchets hautement radioactifs et les conséquences sur l'environnement d'un accident sont considérables.

4. 20 % d'énergie renouvelable : favoriser le développement de l'éolien ou du solaire chez les particuliers et les fournisseurs d'énergie...

20 % de réduction d'émission de CO₂ : favoriser les automobiles sobres, développement des transports en commun, du ferroutage...

20 % d'économie d'énergie : construction de bâtiment basse consommation, rénovation, télétravail...

5. Première problématique possible autour de la croissance de la demande énergétique mondiale et des réserves fossiles limitées.

Seconde problématique possible autour de l'utilisation massive des hydrocarbures et de l'émission de gaz à effet de serre qui provoqueraient le changement climatique.

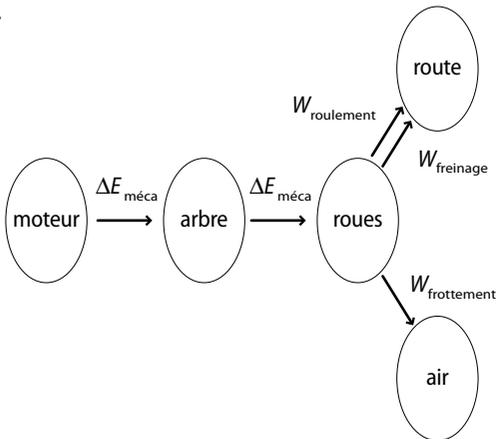
6. Conception de nouvelles chaînes énergétiques avec des énergies renouvelables (solaire photovoltaïque ou thermodynamique, hydraulique ETM, biocarburant) ou projets scientifiques internationaux (ITER).

ACTIVITÉ 2

Bilan énergétique d'une voiture

p. 443

1. a.



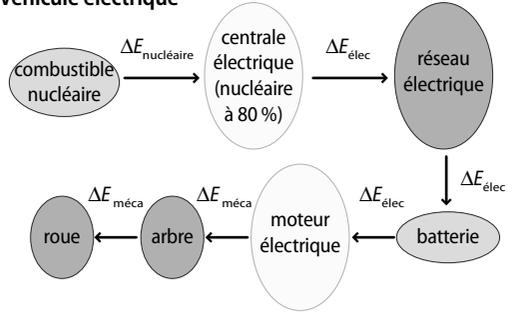
b. Les pertes dues au freinage grâce à un système de récupération d'énergie (freinage régénératif) sur les modèles hybrides ou électriques.

2. a. Électrique : $\eta_{\text{élec}} = 90\% \times 85\% \times 1,15 = 88\%$; thermique : $\eta_{\text{therm}} = 24\% \times 85\% \times 1,00 = 20\%$; hybride : $\eta_{\text{hyb}} = 24\% \times 85\% \times 1,15 = 23\%$.

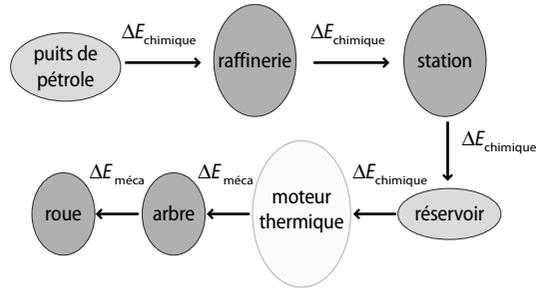
b. Non car le bilan énergétique doit se calculer de l'énergie primaire à l'énergie utile.

3. Puits = source de l'énergie primaire.

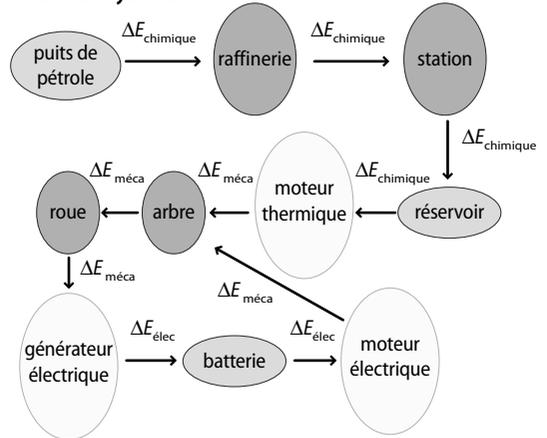
4. • Véhicule électrique



• Véhicule thermique



• Véhicule hybride



5. Électrique : 24 % ; thermique : 80 % ; hybride : 80 %.

6. a. Électrique : 21 % ; thermique : 16 % ; hybride : 19 %.
b. Le bilan énergétique des véhicules électriques actuels n'est que légèrement meilleur à celui des véhicules hybrides.

Remarque : les véhicules électriques ne polluent pas à l'intérieur des agglomérations.

ACTIVITÉ 3

Économiser l'énergie dans l'habitat

p. 444

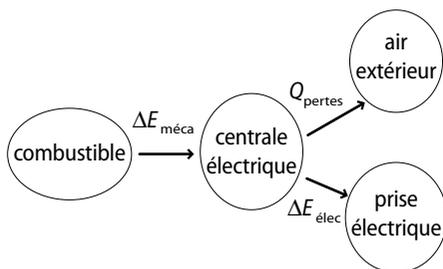
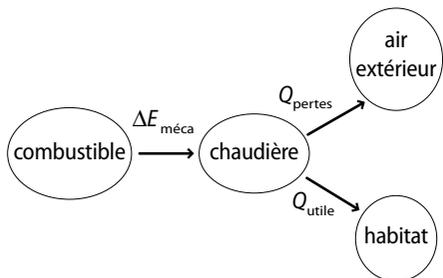
1. Avec les transports et l'industrie, l'habitat et le tertiaire sont les secteurs les plus énergivores et leur consommation n'a pas diminué au cours des dernières décennies.

2. a. Énergie solaire (panneaux photovoltaïques), énergie géothermique (pompe à chaleur et puits).

- b. Les sources d'énergie renouvelable permettent d'économiser de l'énergie primaire fossile. L'isolation renforcée et le triple vitrage permettent de diminuer les pertes, donc la demande énergétique de l'habitation.
- c. Isolation des bâtiments possible, pose de panneaux photovoltaïques, pose de double ou triple vitrage.

3. a. Énergie primaire : combustible, énergie finale : énergie thermique et énergie électrique.

b.



4. Pour une même valeur de l'énergie finale de : $60 + 30 = 90$ u.a., il faut 175 u.a. d'énergie primaire sans cogénération contre 100 avec, soit une économie de 43 % en énergie primaire.

5. Pour développer la cogénération, il faut que les deux besoins en électricité et en chaleur existent. Dans une ferme isolée, un cogénérateur de petite taille peut produire de l'électricité (hors réseau) et de la chaleur pour les bâtiments. En ville, un lotissement ou un bâtiment peuvent être équipés d'un cogénérateur collectif. Dans une zone industrielle, l'énergie dégradée par combustion d'une usine peut être utilisée pour générer de l'électricité.

6. En choisissant différents exemples : construction neuve, à rénover, habitat isolé ou collectif, argumenter parmi les différentes solutions ou en proposer d'autres.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : Identifier des problématiques énergétiques contemporaines

1. **1. Vrai.** Ils mettent des millions d'années à se reconstituer.
2. **Faux.** L'énergie électrique est une énergie finale produite à partir de différentes énergies primaires.

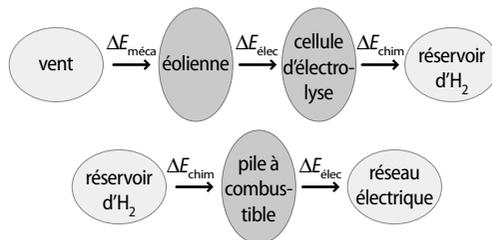
3. **Faux.** L'énergie nucléaire n'est pas renouvelable et pourtant, sa production n'émet quasiment pas de CO_2 .

2. **1.** La croissance démographique provoque une augmentation de la demande énergétique à laquelle il faut répondre.

2. L'intensité énergétique doit diminuer.

3. **1.** La part des énergies renouvelables intermittentes augmente, il faut donc stocker l'énergie électrique produite. Or le stockage hydraulique est insuffisant. Quant au stockage par batterie, il s'avère coûteux et peu efficace (trop de pertes).

2.



3. La production de dihydrogène et son utilisation, comme nouveau vecteur d'énergie, permettraient d'éviter l'épuisement des ressources fossiles et l'émission de gaz à effet de serre.

4 Le pic pétrolier et l'avion solaire

Solar impulse est un avion à énergie solaire qui peut parcourir de longues distances. Ce projet a été élaboré autour d'un enjeu énergétique : l'agence internationale de l'énergie estime que la production de pétrole a atteint son pic maximum et diminue désormais. Sur Terre à midi, chaque mètre carré de surface terrestre reçoit l'équivalent de 1 000 W de puissance lumineuse. Sur 24 heures, la puissance moyenne s'établit à 250 W/m². Avec 200 m² de cellules photovoltaïques et un rendement global de la chaîne de propulsion de 12 %, les moteurs atteignent une puissance inférieure à 6 kW. C'est à peine celle dont les frères Wright disposaient pour effectuer leur premier vol motorisé en 1903. Et c'est avec cette énergie optimisée du panneau solaire à l'hélice que Solar Impulse a l'ambition de voler nuit et jour sans carburant !

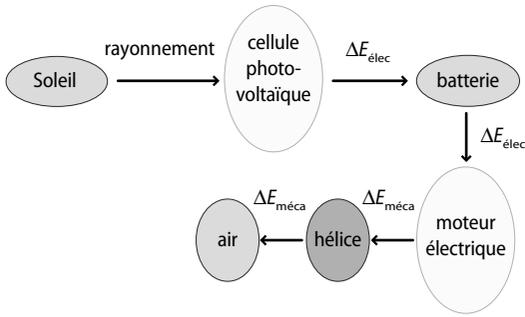
1. Identifier la problématique énergétique présentée dans ce document.

Les hydrocarbures et le pétrole sont des énergies fossiles non renouvelables.

2. Indiquer la source d'énergie primaire, les deux convertisseurs d'énergie et l'énergie finale dans cet avion.

Le Soleil est la source d'énergie primaire, les convertisseurs d'énergie sont les cellules photovoltaïques et le moteur électrique.

3. Représenter la chaîne énergétique de l'avion en fonctionnement.



COMPÉTENCE 2 : Faire un bilan énergétique dans les domaines de l'habitat ou du transport

5 1. c. 2. b. 3. a et c.

6 a. $2,4 \times 10^4 / 100 = 240 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$: catégorie E.
 b. $3,6 \times 10^{10} / 3600 / 1000 / 100 = 100 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$: catégorie C.

8 1. Rendement = $0,90 \times 0,31 = 28 \%$, le gain énergétique par rapport au bus thermique est plus faible que celui mis en avant.
 2. Pas d'émission de gaz à effet de serre en milieu urbain, ni d'autre polluant, assez silencieux, durée de vie longue.

COMPÉTENCE 3 : Argumenter sur des solutions permettant de réaliser des économies d'énergie

9 1. a, b et c.
 2. b et c.

10 1. Production = $20 / 15,3 \% = 1,3 \times 10^2 \text{ Mtep}$ (= $5,5 \times 10^{18} \text{ J}$).

2.

	Transport	Habitat (résidentiel tertiaire)
Biocarburant	oui	oui
Hydraulique	non*	oui
Bois énergie	non*	oui
Déchet urbain	oui (méthanisation)	oui
Pompe à chaleur	non	oui
Éolien	non*	oui
Résidus agricoles	non*	oui
Biogaz	oui	oui
Géothermie	non	oui
Solaire thermique	non	oui
Solaire photovoltaïque	non*	oui

* sauf véhicule électrique

3. Consommation énergétique totale = $133 \text{ Mtep} + 1,3 \times 10^2 \text{ Mtep} = 2,6 \times 10^2 \text{ Mtep}$.

Donc les 20 Mtep d'énergies renouvelables produites et consommées représentaient 7,6 % de la consommation énergétique totale. L'objectif de 20 % en 2020 n'était pas atteint en 2009.

11 1. Cette technologie permet de consommer moins de carburant.

2. Discussion possible autour des avancées technologiques des constructeurs automobiles à partir du document 1. Discussion possible autour des déplacements en mode doux en ville à partir du document 2.

12 1. a. Part de la biomasse = $2,3 + 9,1 + 0,35 + 0,3 = 12,1 \text{ Mtep}$, soit 60 % des énergies renouvelables.

b. Le bois-énergie représente 75 % de la biomasse.

2. Le carbone relâché dans l'atmosphère après combustion sous forme de CO_2 avait été capté préalablement par l'arbre (photosynthèse). Il reste les émissions dues à la coupe et au transport.

3. La production de bois peut être locale, son utilisation permet de produire l'énergie directement dans l'habitat sans nécessiter d'infrastructure lourde.

4. Il s'agit d'une énergie primaire renouvelable, qui prend la place d'énergies primaires fossiles non renouvelables (gaz, pétrole, charbon, uranium).

5. La combustion doit être complète ; il faut évacuer les particules émises, les COV et les HAP par ventilation ; l'exploitation des forêts doit être raisonnable.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

13 1. Après isolation, le flux thermique a diminué, donc la résistance thermique a augmenté.

2. Apports : éclairage, chauffage, habitant, appareils électriques.

Pertes : ventilation, flux thermique à travers les parois.

3. a. En régime permanent, $\Delta E_{\text{totale}} = E_{\text{apports}} - E_{\text{pertes}} = 0$.

b. $P_{\text{apports}} - P_{\text{pertes}} = 0$.

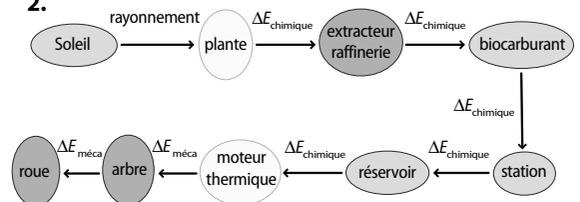
4. On suppose que Jean est absent de son studio, l'éclairage et les appareils électriques sont éteints :

$$P_{\text{chauffage}} - P_{\text{ventilation}} - \Phi_{\text{mur}} - \Phi_{\text{vitre}} = 0,$$

soit $P_{\text{chauffage}} = 396 \text{ W}$.

14 1. La part des biocarburants parmi les énergies renouvelables augmente en France.

2.



3. Épuisement des réserves fossiles, émission de gaz à effet de serre.

15 1. Économies d'énergie pour répondre à la croissance démographique, réduction des émissions de gaz à effet de serre et de la pollution, lutte contre l'épuisement des réserves fossiles.

2. Apportent un gain énergétique : panneaux solaires thermiques, photovoltaïques, éolienne, géothermie. Limitent les pertes énergétiques : approche bioclimatique, isolation renforcée, domotique.

3. Le bâtiment de gauche subit de fortes pertes thermiques à travers ses parois contrairement à l'autre. Seul le bâtiment de droite pourrait être à énergie positive.

16 1. Ce sont des énergies renouvelables qui évitent l'épuisement des ressources fossiles et l'émission de gaz à effet de serre.

2. L'hydraulique (marée) et le solaire thermique sont aussi des énergies intermittentes.

3. Le stockage d'énergie électrique est coûteux et insuffisamment efficace.

4. Les centrales nucléaires mettent plusieurs jours pour atteindre leur puissance de fonctionnement, tandis que les centrales à charbon ont un temps de mise en marche très court.

5. L'énergie éolienne apportera une solution au défi énergétique, à condition de savoir stocker l'énergie électrique ou d'utiliser d'autres énergies renouvelables non intermittentes, comme l'hydraulique des cours d'eau ou autre, pour compenser l'absence de vent.

17 Le freinage régénératif

Dès les années 1950, le physicien Richard Feynman a imaginé stocker l'énergie cinétique d'un véhicule perdue au freinage. Ce n'est pourtant que récemment que les ingénieurs automobiles sont parvenus à mettre au point un système efficace de récupération de l'énergie cinétique au freinage et sa conversion en énergie électrique. Ainsi, ce système peut être utilisé pour recharger les batteries du véhicule pour une prochaine utilisation. Aujourd'hui, on trouve ce système de freinage, appelé freinage régénératif, dans les véhicules hybrides et dans les véhicules électriques pour lesquels la recharge des batteries est importante. Le freinage régénératif a d'abord été utilisé dans les trolleybus puis a ensuite trouvé place dans les bicyclettes ou les voitures de Formule 1. Le freinage régénératif permet de récupérer jusqu'à la moitié de l'énergie cinétique perdue, ce qui permet de réduire la consommation en carburant de 10 à 25 %. Le freinage régénératif hydraulique

pourrait même permettre des gains en consommation allant de 25 % jusqu'à 45 %.

1. Décrire la transformation énergétique qui a lieu avec un système de freinage régénératif.

Une partie de l'énergie cinétique du véhicule est convertie en énergie électrique (grâce au moteur électrique qui fonctionne en générateur).

2. Lorsqu'on freine dans un véhicule classique, en quoi est convertie l'énergie cinétique du véhicule ?

L'énergie cinétique du véhicule est convertie en « chaleur », perte par transfert thermique vers le milieu extérieur.

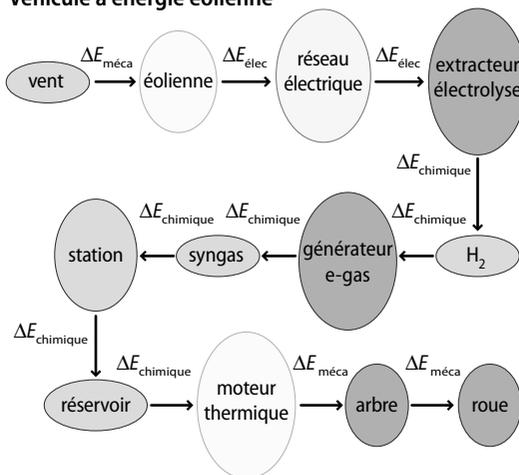
3. Comment le freinage régénératif apporte-t-il des solutions au défi énergétique ?

Par économie de carburant, donc il retarde l'épuisement des ressources fossiles et les émissions de gaz à effet de serre.

4. Ce système peut-il s'appliquer à tout type de véhicule ? Ce système peut s'appliquer à tout véhicule roulant : train, bus, voiture, vélo...

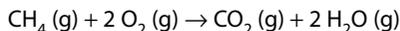
18 1.

Véhicule à énergie éolienne



2. a. Électrolyse de l'eau : $2 \text{H}_2\text{O} (\text{l}) \rightarrow \text{O}_2 (\text{g}) + 2 \text{H}_2 (\text{g})$

b. Combustion du méthane :



c. Le syngas contenant du méthane est produit à partir de CO_2 recyclé en sortie d'usine.

3. a. Épuisement des ressources fossiles et émission massive de gaz à effet de serre.

b. Elle évite l'épuisement des ressources fossiles et permet de recycler le dioxyde de carbone.

Mais elle nécessite un développement massif de nouvelles infrastructures (transport et production), énergie éolienne coûteuse en investissement et entretien (exemple des éoliennes en mer du Nord).

Chimie et respect de l'environnement

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
– Chimie durable : <ul style="list-style-type: none"> • économie d'atomes ; • limitation des déchets ; • agroressources ; • chimie douce ; • choix des solvants ; • recyclage. – Valorisation du dioxyde de carbone.	– Extraire et exploiter des informations en lien avec : <ul style="list-style-type: none"> • la chimie durable ; • la valorisation du dioxyde de carbone. – Pour comparer les avantages et les inconvénients de procédés de synthèse du point de vue du respect de l'environnement.

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Extraire et exploiter des informations sur une synthèse chimique plus abordable.
2. Extraire et exploiter des informations sur une chimie durable.

Évaluation diagnostique

p. 454

SITUATION 1

L'industrie chimique utilise et produit nombre d'espèces chimiques toxiques. Une chimie verte, durable, se développe. En proposant des procédés alternatifs, elle contribue à la préservation de l'environnement, ce que présentent les **activités 1 et 2**.

SITUATION 2

Le dioxyde de carbone, produit de l'usage des combustibles fossiles et de la biomasse, bien qu'innocent du point de vue de la santé humaine, est un gaz à effet de serre dont l'augmentation de la concentration dans l'atmosphère concourt au réchauffement climatique. Dans quelle mesure son utilisation par l'industrie chimique, pharmaceutique ou encore alimentaire peut-elle permettre d'en réduire l'émission anthropique ? C'est la réflexion que propose de conduire l'**activité 3**.

SITUATION 3

Les solvants organiques que nous utilisons au quotidien présentent-ils une réelle innocuité ou au contraire nécessitent-ils quelques précautions d'emplois, ou convient-

il encore de les bannir... ? C'est sur ces questions que l'**activité 4** propose des éclairages.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

La chimie verte mûrit

p. 456

1. Il est probable que les récentes catastrophes industrielles telles que :

- Seveso (1976) en Italie, où un rejet de dioxine provoque un désastre écologique majeur ;
- Bhopal (1984) en Inde, où un pesticide induit la mort d'au moins 20 000 personnes ;
- ou encore l'usine AZF (2001) en France, où 30 personnes sont tuées par l'explosion d'un stock d'engrais, ont participé à dégrader l'image de la chimie dans l'opinion publique.

2. La chimie verte propose l'utilisation de procédés pour réduire ou éliminer l'usage et la production de substances nocives, en utilisant des méthodes alternatives et des voies de synthèses plus respectueuses de l'environnement. Elle se décline en 12 principes qui en fondent les bases.

3. Les principes dits « de sûreté » sont :

- concevoir des synthèses chimiques moins dangereuses ;
- concevoir des produits chimiques moins toxiques ;
- utiliser des solvants et des auxiliaires de synthèses moins polluants ;

- analyser en continu pour prévenir la pollution ;
- développer une chimie fondamentale plus préventive.

4. L'immense majorité des produits chimiques que nous utilisons au quotidien sont issus de la pétrochimie dont les procédés n'empruntent guère à la chimie verte. Cette industrie est la principale responsable de la toxicité de notre environnement.

5. a. Les biomolécules, issues de la biomasse, présentent plusieurs avantages :

- biodégradables, elles peuvent être décomposées naturellement par des organismes vivants en des molécules plus petites ;
- leur combustion éventuelle ne contribue que dans une moindre mesure à l'augmentation du dioxyde de carbone anthropique car la biomasse, dont elles sont issues, participait initialement au cycle du carbone ;
- elles sont renouvelables.

b. Les diesters du colza et du tournesol peuvent se substituer au pétrogasoil. Les polymères biodégradables que sont le biopol, l'amidon, la cellulose ou encore le polyéthylène glycol peuvent avantageusement remplacer les polymères issus de la pétrochimie. Le POP, colorant jaune extrait du jus de pomme, peut se substituer au colorant azoïque de synthèse. Des triesters d'acides gras extraits de la biomasse permettent d'obtenir des tensioactifs, des détergents, ou encore des lubrifiants des solvants verts en lieu et place de ceux produits par la pétrochimie.

6. L'usage des biomolécules souscrit évidemment à certains des principes de la chimie verte :

- concevoir des produits chimiques moins toxiques ;
- utiliser des ressources renouvelables à la place des produits fossiles ;
- concevoir des produits biodégradables ;
- utiliser des solvants et des auxiliaires de synthèses moins polluants ;
- utiliser la catalyse de préférence aux procédés stœchiométriques.

ACTIVITÉ 2

Synthèse de l'ibuprofène

p. 457

1. En regard du procédé historique, les principes de la chimie verte que paraît avoir intégré le nouveau procédé sont :

- éviter la production de résidus ;
- maximiser les économies d'atomes et d'étapes ;
- augmenter l'efficacité énergétique ;
- éviter la production de dérivés chimiques ;
- utiliser la catalyse de préférence aux procédés stœchiométriques.

2. a.

Procédé historique		Nouveau procédé	
Réactifs	Masse molaire	Réactifs	Masse molaire
$C_{10}H_{14}$	134	$C_{10}H_{14}$	134
$(CH_3CO)_2O$	102	$(CH_3CO)_2O$	118
C_2H_5ONa	68	H_2	2
$C_4H_7ClO_2$	122,5	CO	28
H_3O^+	19		
NH_3O	33		
NH_2OH	36		
Produit	Masse molaire	Produit	Masse molaire
Ibuprofène $C_{13}H_{18}O_2$	206	Ibuprofène $C_{13}H_{18}O_2$	206

$$UA(\text{historique}) = \frac{206}{(134 + 102 + 68 + 122,5 + 19 + 33 + 36)} = 40,0\%$$

$$UA(\text{nouveau}) = \frac{206}{(134 + 118 + 2 + 28)} = 73,0\%$$

b. L'acide éthanoïque est l'unique sous-produit formé à l'issue de l'étape 1 du nouveau procédé de synthèse. Dans la mesure où il est précurseur de nombreuses synthèses organiques et donc recyclable, on peut considérer que l'économie d'atome réalisée est donc de 100 %.

3. Dans une réaction de synthèse, un catalyseur concourt à diminuer la durée de la réaction et par là même à économiser de l'énergie si elle nécessite haute température ou haute pression. Sélectif, il permet également de n'obtenir qu'un seul produit.

4. a. Au cours d'une réaction d'addition, une liaison double se transforme en liaison simple. Au cours d'une réaction de substitution un atome ou groupe d'atomes, lié à un carbone par une liaison simple, est remplacé par un autre atome ou groupe d'atomes. Enfin, au cours d'une réaction d'élimination, une des liaisons simples se transforme en liaison double.

b. Les réactions d'addition présentent l'économie d'atome la plus importante. Concernant les réactions de substitution ou d'élimination, l'économie d'atome dépend de la nature des groupes éliminés, soit des sous-produits formés.

5. Pour isoler le produit recherché, l'extraction, la purification, la recrystallisation nécessite nombre de solvants volatils..., ces derniers devant par la suite être eux-mêmes recyclés. De plus, les coûts en terme de matière qu'ils engendrent, tous ces procédés nécessitent des conditions de température et de pression spécifiques énergétivores. Enfin, l'usage de ces solvants est nuisible à la santé des opérateurs et à l'environnement.

ACTIVITÉ 3

Quelles perspectives pour la carbochimie ? p. 458

1. a. Le CSC consiste à capter du CO_2 depuis ses sources industrielles (cimenteries, raffineries, sidérurgie), le transporter puis le stocker. Toutefois, les technologies de récupération sont encore très coûteuses. En effet, piéger le CO_2 à sa source nécessite de le séparer des autres constituants que sont vapeur d'eau, oxydes d'azote et de soufre issus des processus de combustion industriels d'hydrocarbures, de charbon, de gaz naturel ou de biomasse. L'objectif du CSC est de réduire les rejets du CO_2 anthropique afin de limiter l'augmentation de l'effet de serre en attendant l'émergence et la généralisation de sources énergétiques non émettrices.

b. Le CSC ne consiste pas en un quelconque recyclage : le dioxyde de carbone capté n'est pas utilisé à des fins industrielles, il s'agit d'un simple stockage.

2. Lors de la récupération assistée des hydrocarbures, du CO_2 est injecté sous pression dans les nappes d'hydrocarbures. Il s'y dissout ce qui diminue la viscosité, et facilite la récupération des hydrocarbures. Lors de son injection, une partie du CO_2 est stockée dans « les pores vides » et une autre partie est extraite depuis le pétrole brut récupéré afin d'être réinjecté dans le système. Cette utilisation du CO_2 anthropique peut donc être considérée comme une voie de valorisation, mais aussi de stockage.

3. Aujourd'hui dans le monde, ses applications industrielles consomment annuellement une quinzaine de millions de tonnes de CO_2 . (À titre de comparaison, 30 GT de CO_2 anthropique sont émises annuellement du fait de la combustion des énergies fossiles !)

4. Selon les applications, le CO_2 est rejeté rapidement dans l'atmosphère (boissons gazeuses) ou à plus long terme (solvant supercritique, réfrigérant). Dans ses applications industrielles, la durée de séquestration du CO_2 ne semble donc pas à ce jour avoir été un argument pertinent justifiant de son usage pour la prévention de l'effet de serre anthropique.

5. Les plantes vertes synthétisent leur matière organique constitutive grâce à la photosynthèse, consommatrice de CO_2 . Injecter du CO_2 « industriel » dans des cultures de microalgues contribue donc à accélérer leur croissance et participe au recyclage du CO_2 anthropique.

6. La carbochimie, puisqu'elle utilise le dioxyde de carbone anthropique comme matière première, est un acteur de premier plan pour lutter contre l'effet de serre contrairement à la pétrochimie qui en est le principal pourvoyeur.

7. L'industrie chimique se propose de capter et de stocker le dioxyde de carbone émis, puis éventuellement de le valoriser.

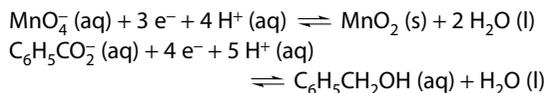
8. « À l'horizon 2020, l'utilisation de CO_2 capté pourrait atteindre de 5 à 10 % de l'émission anthropique annuelle mondiale » de fait, de l'avis même de l'ADEME, en aucun cas la valorisation du CO_2 ne peut se substituer à la nécessaire mutation des sources d'énergies.

ACTIVITÉ 4

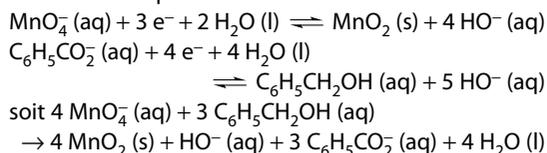
Synthèses de l'acide benzoïque

p. 459

1. En milieu acide :



En milieu basique :



2. Lors de la filtration, c'est le dioxyde de manganèse $\text{MnO}_2 (\text{s})$ qui est éliminé.

3. C'est l'alcool benzylique, soluble dans le cyclohexane que l'on souhaite extraire du milieu réactionnel lors de cette étape.

4. a. Toutes les espèces chimiques utilisées lors de cette synthèse au laboratoire nécessitent des précautions d'utilisation : nocive par inhalation et bien sûr par ingestion, irritante pour la peau et les yeux, susceptible de provoquer de graves brûlures, ou encore de favoriser l'inflammation de combustibles ou facilement inflammable, nocive pour l'environnement (aquatique).

b. Hormis l'acide benzoïque, produit de cette synthèse, il convient de recycler l'alcool benzylique et la soude excédentaires, tout comme le cyclohexane solvant d'extraction. Le dioxyde de manganèse peut être également recyclé pour une utilisation en métallurgie : fabrication de manganèse et de ses alliages, industrie de la fonte et de l'acier, de l'aluminium, du cuivre et du nickel, ou encore la fabrication d'électrodes de soudage ou de piles sèches, comme colorant dans l'industrie des verres et céramiques.

5.

$$\begin{aligned} \text{UA}(\text{laboratoire}) &= \frac{M(\text{acide benzoïque})}{(M(\text{KMnO}_4) + M(\text{alcool benzylique}))} \\ &= \frac{3 \times 121}{(4 \times 158 + 3 \times 108)} = 38 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{UA}(\text{industrie}) &= \frac{M(\text{acide benzoïque})}{(M(\text{toluène}) + M(\text{dioxygène}))} \\ &= \frac{2 \times 122}{(2 \times 92 + 3 \times 32)} = 87 \% \end{aligned}$$

6. Au laboratoire, contrairement aux principes de la « chimie verte », sont utilisées et coproduites des

espèces chimiques toxiques pour la santé de l'expérimentateur et polluantes pour l'environnement.

7. Le procédé industriel, qui utilise la catalyse hétérogène, est relativement économe d'énergie puisque mis en œuvre sous des température et pression proches des conditions habituelles. L'un des réactifs est l'air, deux de ces constituants non utilisés sont recyclés tout comme le toluène qui n'a pas réagi et qui est réinjecté dans le réacteur.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : Extraire et exploiter des informations sur une synthèse chimique plus responsable

1. Le monoxyde de carbone et le chlorure d'hydrogène sont deux gaz toxiques, sous-produits de la synthèse du carbonate de sodium par le procédé Leblanc.

2. Le chlorure d'ammonium, sous-produit formé lors de l'étape 1 du procédé Solvay, permet la synthèse de l'ammoniac, précurseur de synthèse d'engrais, d'explosifs ou encore de polymères. L'ammoniac peut encore être utilisé comme fluide réfrigérant.

3. L'unique déchet de la synthèse du carbonate de sodium selon le procédé Solvay est le chlorure de calcium. Néanmoins, celui-ci est utilisé dans des unités de réfrigération ou pour la synthèse de ciments.

1. Le 2-méthylpropène a pour formule chimique $(\text{CH}_3)_2\text{C}=\text{CH}_2$.

2. C'est une réaction d'élimination.

$$\begin{aligned} 3. \text{UA} &= \frac{M((\text{CH}_3)_2\text{C}=\text{CH}_2)}{M((\text{CH}_3)_2\text{CBr}-\text{CH}_3) + M(\text{C}_2\text{H}_5\text{ONa})} \\ &= \frac{56}{(137 + 68)} = 27,3\%. \end{aligned}$$

4. a. $(\text{CH}_3)_2\text{CH}-\text{CH}_3 \rightarrow (\text{CH}_3)_2\text{C}=\text{CH}_2 + \text{H}_2$.

$$\text{b. UA} = \frac{M((\text{CH}_3)_2\text{C}=\text{CH}_2)}{M((\text{CH}_3)_2\text{CH}-\text{CH}_3)} = \frac{56}{58} = 96,5\%.$$

L'économie d'atome réalisée par la voie catalytique est largement supérieure à celle obtenue lors de la synthèse empruntant une voie stœchiométrique, souscrivant en cela aux principes de la chimie verte.

1. a. Le solvant de toute réaction permet aux réactifs de se mouvoir et donc d'adopter une configuration propice à la réaction.

b. La synthèse organique utilise des solvants organiques, qui, pour nombre d'entre eux sont toxiques et polluants, ce qui contrevient aux principes d'une chimie soucieuse de l'environnement et de ses travailleurs.

2. Lorsque l'un des réactifs est un solide, l'adsorption à sa surface de l'autre réactif ou sa solubilisation dans ce même réactif, évite l'utilisation d'un solvant.

D'autre part, à l'issue de la synthèse, il convient de les séparer du produit recherché, ce qui est coûteux d'un point de vue énergétique.

3. Un zéolithe, du fait de sa structure comportant de nombreuses cavités, agit comme un solvant en multipliant les lieux de rencontre possible entre les réactifs et favorisant donc leur réaction.

1. a. Les enzymes travaillent à des températures modérées, à pression atmosphérique et dans des solutions proches du pH neutre.

b. L'utilisation d'enzymes permet dans un premier temps d'éviter celle de réactifs toxiques ou corrosifs. De plus, elles permettent d'obtenir des produits sans déchets. Enfin, leurs conditions d'utilisation sont économes en énergie.

2. Un catalyseur spécifique oriente une réaction vers la production d'un unique produit de réaction.

3. Au cours d'une réaction enzymatique, l'économie d'atome réalisée est maximale dans la mesure où la spécificité de ce type de catalyseur conduit à l'obtention de produits plus purs. Ce type de catalyseur élimine les réactions secondaires, ce qui entraîne la réduction des sous-produits indésirables de réaction.

COMPÉTENCE 2 : Extraire et exploiter des informations sur une chimie durable

1. La matière première d'une bioraffinerie est l'ensemble de la biomasse.

2. L'amidon, le glucose, le sorbitol, les triesters d'acides gras ou encore les protéines extraites des végétaux sont quelques-unes des biomolécules précurseurs de biosynthèses.

3. Les fibres textiles végétales, biocarburants, bioplastiques, colles ou détergents sont quelques-uns des bio-produits élaborés à partir des biomolécules extraites dans une raffinerie.

4. Une bioraffinerie s'inscrit pleinement dans une chimie soucieuse de l'environnement. En effet, sa matière première est issue du recyclage de la biomasse. On peut penser que l'impact carbone de telles synthèses est nul puisque le carbone éventuellement rejeté participait en amont au cycle du carbone.

1. Un fluide supercritique a une densité proche de celle d'un liquide et une viscosité proche de celle d'un gaz.

2. Les solvants supercritiques n'altèrent pas les qualités organoleptiques des molécules extraites, leur « pouvoir solvant » dépendant des conditions de température et de pression, il est possible de réguler leur sélectivité en agissant sur ces deux paramètres.

3. Sur le schéma apparaissent en bleu les zones de l'installation où le dioxyde de carbone est à l'état gazeux, en vert celles où on le rencontre à l'état liquide et en rose celles où il est à l'état supercritique.

4. Pour séparer le fluide supercritique de l'extrait, il suffit de procéder à sa détente ; il passe alors à l'état gazeux et s'élimine facilement.

5. Le dioxyde de carbone supercritique permet l'extraction de nombreuses huiles essentielles depuis des plantes, de la caféine du café ou encore de la graisse des viandes.

6. L'usage industriel du dioxyde de carbone comme fluide supercritique permet son stockage et donc contribue à réduire l'effet de serre anthropique.

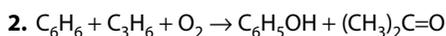
7 1. Du point de vue de son indice de cétane, de sa viscosité et de la quantité d'énergie libérée lors de sa combustion, l'EMC présente des caractéristiques analogues à celles du gazole.

2. On peut considérer que la quantité de dioxyde de carbone émis lors de la combustion d'un biocarburant correspond à celle qui a été captée par la plante dont il est extrait au cours de la photosynthèse qui a vu croître cette dernière.

3. Le soufre présent dans un carburant est responsable de l'émission d'oxyde de soufre dans les gaz d'échappement, gaz à l'origine de l'acidification des pluies.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

$$\mathbf{8\ 1.} \text{ UA} = \frac{M(\text{C}_6\text{H}_5\text{OH})}{(M(\text{C}_6\text{H}_6) + M(\text{H}_2\text{SO}_4) + 2 \times M(\text{NaOH}))} \\ = \frac{94}{(78 + 98,1 + 2 \times 40)} = 36,7\%$$



$$\text{UA} = \frac{M(\text{C}_6\text{H}_5\text{OH})}{(M(\text{C}_6\text{H}_6) + M(\text{C}_3\text{H}_6) + M(\text{O}_2))} \\ = \frac{94}{(78 + 42 + 32)} = 62\%$$

3. Si l'acétone, sous-produit de cette réaction, est recyclée, alors on peut considérer que l'économie d'atome réalisée lors de cette voie de synthèse est de 100 %.

4. L'hydroperoxyde de cumène est un produit extrêmement corrosif, dont le mélange avec l'air au-dessus de 79 °C est susceptible de présenter un caractère explosif, tout comme son contact avec des combustibles ou des matières organiques.

5. Même si l'économie d'atome utilisée par la troisième voie de synthèse est inférieure à 100 %, aucun des intermédiaires de synthèse n'est aussi dangereux que l'hydroperoxyde de cumène. D'autre part, elle ne nécessite que deux étapes et chacune des réactions intermédiaires est

de type catalytique dont on peut penser la spécificité accrue. Ces caractéristiques font que cette voie de synthèse souscrit pleinement aux principes d'une chimie soucieuse de l'environnement et de ses travailleurs.

9 Des réactifs plus verts

Les polyuréthanes sont des polymères très répandus, dont les uréthanes sont les monomères correspondants. Ils étaient préparés historiquement à partir d'isocyanates, traditionnellement synthétisés par réaction du phosgène, un gaz toxique, sur une amine. Plus tard, on développa un nouveau procédé de synthèse où le phosgène fut remplacé par du dioxyde de carbone.

1. Quels sont les réactifs à l'origine du procédé de synthèse historique des polyuréthanes ?

À l'origine de la synthèse des polyuréthanes, les isocyanates étaient produits par l'action du phosgène sur une amine.

2. Quel grave problème pose l'usage de l'un d'entre eux ?
Le phosgène est un gaz très toxique à température ambiante, gaz suffocant utilisé pendant la Première Guerre mondiale comme gaz de combat.

3. Par quel réactif fut-il remplacé ?

Le phosgène fut plus tard remplacé par le dioxyde de carbone.

4. Que peut-on dire à propos de la toxicité de ce réactif et de son impact sur l'effet de serre ?

Le dioxyde de carbone n'est pas un gaz toxique même si c'est un gaz à effet de serre.

10 1. Le benzène et l'acide nitrique sont deux réactifs de cette synthèse à la dangerosité avérée : ils sont respectivement cancérigène et corrosif.

2. Le protoxyde d'azote N_2O , sous-produit de cette réaction, est l'un des responsables de l'effet de serre et de la destruction de la couche d'ozone.

3. Cette voie de synthèse de l'acide adipique est énergivore dans la mesure où les différentes étapes de sa réalisation nécessitent des pressions importantes.

4. Le glucose est un des produits de la photosynthèse. Il peut être extrait de la biomasse.

5. a. *E. coli* est une bactérie qui vit en milieu aqueux. Le solvant de cette seconde voie de synthèse est donc l'eau.

b. Le fait de ne pas utiliser de solvant organique, d'abaisser les coûts énergétiques (*E. coli* agit à température et pression usuelles), de ne pas utiliser de réactifs toxiques ou dangereux, va dans le sens d'une chimie durable et soucieuse de l'environnement.

11 1. On parle de catalyse homogène lorsque les réactifs et le catalyseur de réaction sont dans le même état physique, et de catalyse hétérogène dans le cas contraire.

2. La voie de la catalyse hétérogène semble être la plus économe d'atome : en effet, seules deux étapes sont nécessaires à cette synthèse ; le nombre de sous-produits indésirables de réaction est donc nécessairement moindre.

3. Le rejet d'effluent par une unité de synthèse industrielle nécessite leur traitement : séparation des diverses charges polluantes susceptibles de le constituer, purification respective et recyclage dans d'autres voies de synthèse.

4. C'est la synthèse par catalyse hétérogène (meilleure économie d'atome, pas de solvant utilisé, meilleur rendement, moins de rejets d'effluents).

12 1. La pyrolyse consiste en la décomposition thermique de matières organiques en l'absence de dioxygène. Elle permet d'obtenir un solide carboné, une huile et un gaz. Selon la température, les proportions des trois composés obtenus sont différentes.

2. On peut considérer que la combustion d'un biocharbon présente un bilan carbone nul car le dioxyde de carbone alors produit correspond à celui capté par la plante à l'origine du combustible lors de la photosynthèse.

3. Relativement à la préservation de l'environnement, le biocharbon permet de stocker efficacement le car-

bone constitutif de la biomasse et donc le dioxyde de carbone que ce dernier est susceptible de former lors de la dégradation des plantes.

13 1. Une enzyme est un catalyseur biologique spécifique d'un substrat (biomolécule) et d'une réaction donnée.

2. Cette enzyme permet de catalyser la transformation du monoxyde de carbone en composés carbonés tels que l'éthène, l'éthane ou encore le propane.

3. Ce mode de production serait moins énergétivore que le procédé Fischer-Tropsch dans la mesure où une enzyme agit à température et pression usuelles.

14 1. Il convient le plus souvent de chauffer un milieu réactionnel pour amorcer ou accélérer une réaction chimique.

2. Contrairement au chauffage « traditionnel », le chauffage par micro-ondes est rapide et permet une élévation de température homogène du milieu réactionnel.

3. L'utilisation de micro-ondes permet lors de certaines synthèses de ne plus utiliser de solvants organiques toxiques, nécessitant extraction, purification puis recyclage. Il permet également de réduire le coût énergétique en diminuant le temps de chauffage.

Contrôle de la qualité par dosage

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
<ul style="list-style-type: none"> - Dosage par étalonnage : <ul style="list-style-type: none"> • spectrophotométrie ; loi de Beer-Lambert ; • conductimétrie ; explication qualitative de la loi de Kohlrausch, par analogie avec la loi de Beer-Lambert. - Dosages par titrage direct. - Réaction support de titrage ; caractère quantitatif. - Équivalence dans un titrage ; repérage de l'équivalence pour un titrage pH-métrique, conductimétrique et par utilisation d'un indicateur de fin de réaction. 	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Pratiquer une démarche expérimentale pour déterminer la concentration d'une espèce à l'aide de courbes d'étalonnage en utilisant la spectrophotométrie et la conductimétrie, dans le domaine de la santé, de l'environnement ou du contrôle de qualité.</i> - Établir l'équation de la réaction support de titrage à partir d'un protocole expérimental. - <i>Pratiquer une démarche expérimentale pour déterminer la concentration d'une espèce chimique par titrage par le suivi d'une grandeur physique et par la visualisation d'un changement de couleur, dans le domaine de la santé, de l'environnement ou du contrôle de qualité.</i> - Interpréter qualitativement un changement de pente dans un titrage conductimétrique.

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Réaliser et exploiter des dosages par étalonnage.
2. Comprendre le principe d'un titrage direct.
3. Repérer l'équivalence d'un titrage par colorimétrie, pH-métrie et conductimétrie.

Évaluation diagnostique

p. 468

SITUATION 1

L'objectif de cette situation est de revenir sur la notion de dosage par étalonnage.

En réalisant une échelle de teintes à partir d'une solution mère de carmoisine, on peut, grâce à une courbe d'étalonnage obtenue par spectrophotométrie, en déduire la teneur en carmoisine de la solution à étudier.

Cette notion est reprise dans l'**activité 2** avec un dosage par étalonnage conductimétrique.

SITUATION 2

Cette situation vise à aborder l'évolution du pH lors d'un dosage acido-basique.

Lorsqu'on ajoute une base dans une boisson au cola, son pH augmente par sauts, et non pas linéairement comme certains élèves pourraient s'y attendre.

Cette notion est reprise et exploitée lors de l'**activité 4** avec un dosage pH-métrique.

SITUATION 3

On cherche à travers cette situation à initier les élèves à la notion d'équivalence.

Au moment où la solution devient colorée, toute l'eau oxygénée initialement présente a réagi. Connaissant la quantité de permanganate de potassium versée et les proportions dans lesquelles ces deux réactifs réagissent, on peut en déduire la quantité d'eau oxygénée initiale. Cette notion est reprise dans les **activités 3** et **4** avec différents dosages par titrage.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

Des dosages et nous

p. 470

1. Une prise de sang permet de faire un bilan de santé. On y parvient en mesurant la quantité de certaines substances dans le sang (globules rouges, plaquettes, glucose, etc.), donc en procédant à des dosages de ces substances chimiques.

2. Pour déterminer la quantité de feuilles nécessaires à la fabrication d'un médicament, il faut connaître la quantité de principe actif contenue dans une feuille, et donc il faut doser le principe actif du médicament contenu dans une feuille de ginkgo.

3. Figure 3 : pour s'assurer de la potabilité ou non de l'eau des fontaines, les autorités publiques procèdent à des dosages de substances toxiques. Si celles-ci dépassent un certain seuil, l'eau est déclarée non potable.

Figures 4 et 6 : un contrôleur technique peut vérifier si le produit répond au cahier des charges imposé par l'entreprise, donc vérifier par exemple que la teneur en certaines substances chimiques correspond à celle de la recette. Il peut vérifier également que le produit répond aux normes en vigueur, par exemple vérifier que la teneur en certaines substances toxiques est inférieure à un seuil imposé par les normes européennes.

Figure 5 : des limitations de vitesse peuvent être fixées à des moments où la teneur en substances polluantes dans l'air est trop importante. Pour ce faire, les autorités publiques dosent régulièrement ces substances dans l'air.

4. Toutes ces photographies évoquent des situations où des dosages de substances chimiques sont nécessaires.

5. Les domaines présentés ici, qui peuvent être touchés par la nécessité de doser des espèces chimiques, sont les domaines de la santé (médecine, pharmacologie), l'environnement (pollution, eau des fontaines publiques), et l'industrie (contrôles de qualité d'un produit industriel).

ACTIVITÉ 2

Dosage d'un sérum physiologique

p. 471

1. À l'aide d'une pipette jaugée, on prélève 5,0 mL de sérum physiologique, que l'on introduit dans une fiole jaugée de 100,0 mL (ou 2,5 mL de sérum dans une fiole jaugée de 50,0 mL). On ajoute de l'eau distillée jusqu'aux 2/3 de la fiole, on bouche et on homogénéise, puis on complète jusqu'au trait de jauge et on homogénéise.

2. $c_1 = c_0 \cdot V_0 / V_1 = 2,00 \times 10^{-2} \times 5,0 / 50,0 = 2,0 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$; on calcule de même :
 $c_2 = 4,00 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$; $c_3 = 6,00 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
 $c_4 = 8,00 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$; $c_5 = 10,0 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

3. a. On fait les mesures de la solution la plus diluée à la plus concentrée pour qu'il y ait le moins d'ions possibles qui restent sur la cellule et qui faussent la mesure.

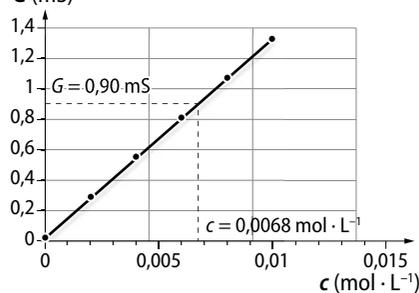
b. Lors de l'utilisation de la cellule de mesure conductimétrique, il faut vérifier qu'elle plonge bien dans la solution et qu'il n'y a pas de bulle à l'intérieur de la cellule.

4. a.

Solution	eau distillée	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
G (mS)	0,00	0,29	0,55	0,81	1,07	1,32

b. Le conductimètre utilisé permet de donner un résultat avec deux chiffres après la virgule, donc avec deux chiffres significatifs pour les conductances de S₁ à S₃ et trois chiffres significatifs pour les conductances de S₄ et S₅.

c. et d. **G (mS) Droite d'étalonnage**



• G — Linéaire (G)

5. Il faut diluer le sérum physiologique car la loi de Kohlrausch qui indique une relation linéaire entre la conductance et la concentration n'est valable qu'aux faibles concentrations.

6. a. On mesure $G(S_d)_{lu} = 0,90 \text{ mS}$. Sans indication supplémentaire sur la précision de l'appareil, on considère que l'incertitude porte sur le dernier chiffre affiché, soit :
 $G(S_d) = 0,90 \pm 0,01 \text{ mS}$.

b. On trouve d'après le graphique $c_d = 6,8 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Donc $c = 20 \times c_d = 0,14 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

c. Tous les binômes ne trouvent pas le même résultat car les dilutions, les valeurs de conductance relevées et le tracé de la droite de régression sont entachés d'erreur.

d. Il faut calculer $c = c_{\text{moy}} \pm \Delta c$ avec c_{moy} la moyenne des valeurs obtenues, et Δc l'incertitude, double de l'écart-type déterminé par la calculatrice.

7. a. On a $c_{\text{fab}} = n_{\text{NaCl}} / V_{\text{sérum}} = m_{\text{NaCl}} / [M_{\text{NaCl}} \cdot V_{\text{sérum}}] = 0,9 \% \times m_{\text{sérum}} / [M_{\text{NaCl}} \cdot V_{\text{sérum}}] = 0,9 \% \times \rho_{\text{sérum}} / M_{\text{NaCl}} = 0,9 \% \times d_{\text{sérum}} \cdot \rho_{\text{eau}} / M_{\text{NaCl}} = 0,9 \% \times 1,00 \times 1,00 \times 10^3 / (23,0 + 35,5) = 0,15 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

b. La concentration molaire donnée par le fabricant est en accord avec celle trouvée expérimentalement. L'écart relatif vaut $|0,14 - 0,15| / 0,15 = 12 \%$.

ACTIVITÉ 3

Titrage par conductimétrie

p. 472

1. a. $\text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq}) + \text{HO}^- (\text{aq}) \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} (\text{l})$

b.

	Avant l'équivalence	Après l'équivalence
Ions présents en solution	$\text{Na}^+, \text{HO}^-, \text{Cl}^-$	$\text{Na}^+, \text{H}_3\text{O}^+, \text{Cl}^-$
Comment évolue la concentration de chaque ion au cours du titrage ?	$[\text{Na}^+]$ ne varie pas. $[\text{HO}^-]$ diminue. $[\text{Cl}^-]$ augmente.	$[\text{Na}^+]$ ne varie pas. $[\text{H}_3\text{O}^+]$ augmente. $[\text{Cl}^-]$ augmente.
Comment évolue la conductance de la solution au cours du titrage ?	$\lambda(\text{HO}^-) \gg \lambda(\text{Cl}^-)$ donc la conductivité diminue.	La conductivité augmente.

c. Cette prévision est bien en accord avec le graphique obtenu.

d. L'intersection des deux droites correspond au moment du titrage où il n'y a plus d'ions hydroxyde, et pas encore d'ions oxonium en excès : c'est donc l'équivalence du titrage.

2. a. À l'équivalence, on a :

$$n(\text{HO}^-, \text{à doser}) = n(\text{H}_3\text{O}^+, \text{versé à l'équivalence}).$$

b. On a donc $c_d = n(\text{HO}^-, \text{à doser})/V_d$

$$= n(\text{H}_3\text{O}^+, \text{versé à l'équivalence})/V_d$$

$$= c_A \cdot V_E/V_d = 0,20 \times 14,2/10,0 = 0,28 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

Et $c_{\text{exp}} = 10 \cdot c_d = 2,8 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (en fait $2,84 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$).

3. a. $c_{\text{fab}} = n(\text{NaOH})_{\text{dans 1 L de déboucheur}}/V_{(1 \text{ L de déboucheur})}$

$$= m(\text{NaOH})_{\text{dans 1 L de déboucheur}}/[M(\text{NaOH}) \cdot V_{(1 \text{ L de déboucheur})}]$$

$$= 10 \% \cdot m_{(1 \text{ L de déboucheur})}/[M(\text{NaOH}) \cdot V_{(1 \text{ L de déboucheur})}]$$

$$= 10 \% \times 1,1 \times 1,00 \times 10^3/(40,0 \times 1,0) = 2,8 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

(en fait $2,75 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$).

b. Cette valeur est bien en accord avec celle trouvée expérimentalement. L'écart relatif vaut :

$$|2,75 - 2,84|/2,75 = 3,3 \%$$

4. a. Lors d'un titrage conductimétrique, on repère l'équivalence par un changement de pente sur le graphe représentant la conductance de la solution en fonction du volume de solution titrante versé.

b. L'équivalence d'un titrage est facilement repérable si les pentes des droites avant et après l'équivalence sur le graphe sont très différentes, donc il faut soit qu'il y ait changement du signe de la pente, soit une augmentation ou une diminution importante de la pente des droites avant et après l'équivalence.

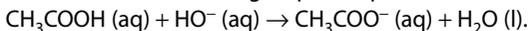
ACTIVITÉ 4

Degré d'acidité d'un vinaigre

p. 473

1. Le facteur de dilution est 10 et la solution fille a un volume de 100 mL : il faut donc prélever $100/10 = 10,0$ mL de solution commerciale. On prélève 10,0 mL de la solution commerciale avec une pipette jaugée de 10 mL munie d'une propipette et on introduit la solution dans une fiole jaugée de 100 mL. On ajoute de l'eau distillée jusqu'aux 2/3 de la fiole, on bouche et on homogénéise. On complète ensuite jusqu'au trait de jauge et on homogénéise.

2. a. La réaction de titrage a pour équation :



À l'équivalence du titrage, les réactifs titrant et titré auront été introduits en proportions stœchiométriques, on a donc, puisque les nombres stœchiométriques dans l'équation de titrage sont les mêmes pour les réactifs titrant et titré : $n_{\text{Ai}} = n_{\text{BE}}$.

b. On a donc $c' \cdot V_A = c_B \cdot V_E$.

c. La solution dosée est S' qui est 10 fois plus diluée que la solution commerciale. La concentration en acide éthanoïque dans la solution commerciale est donc :

$$c = 10 \cdot c' = 10 \cdot c_B \cdot V_E/V_A.$$

Le degré du vinaigre correspondant à la masse d'acide éthanoïque contenue dans 100 g de vinaigre, on a :

$$d^\circ = m_{\text{acide dans 100 g de vinaigre}} = c \cdot M \cdot V_{100 \text{ g de vinaigre}} \\ = c \cdot M \cdot m_{100 \text{ g de vinaigre}}/\rho = 10 \cdot c_B \cdot V_E \cdot M \times 100/(V_A \cdot \rho) \\ = 1000 \cdot c_B \cdot V_E \cdot M/(V_A \cdot \rho) \text{ avec } \rho \text{ exprimée en } \text{g} \cdot \text{L}^{-1}.$$

3. a. b. On peut reporter les points de mesure sur un papier millimétré ou à l'aide d'un tableur-grapheur, en traçant les valeurs du pH en fonction du volume de solution titrante versée. Le volume équivalent peut être déterminé par la méthode des tangentes ou par la méthode de la dérivée. Pour un vinaigre de 7° d'acidité, on trouve un volume équivalent de $V_E = 11,8$ mL.

4. a. La zone de virage de la phénolphthaléine se situe entre des valeurs de pH de 8 à 10 et le saut de pH lors de l'équivalence du titrage du vinaigre contient cette zone de pH. On peut donc utiliser la phénolphthaléine comme indicateur coloré pour ce titrage. À l'équivalence, on passe d'un pH inférieur à 8 à un pH supérieur à 10, donc la phénolphthaléine, initialement incolore, prend une teinte rosée après l'équivalence.

b. À proximité de l'équivalence, on verse la solution titrante goutte à goutte pour déterminer le changement de couleur de l'indicateur coloré à la goutte près et donc le volume équivalent le plus précisément possible.

c. Pour un vinaigre de 7° d'acidité, on trouve un volume équivalent de $V_E = 11,9$ mL.

5. a. Avec les deux valeurs de V_E trouvées, on calcule le degré d'acidité d'après la question 2.c. : $d^\circ = 7,1^\circ$.

b. Sur la pipette jaugée de 10 mL, on lit une incertitude de 0,06 mL et sur la fiole jaugée, on lit une incertitude de 0,08 mL. Ainsi ;

$$\Delta d^\circ/d^\circ = [(0,06/10)^2 + (5/100)^2 + (0,2/11,8)^2 + (0,06/10)^2 \\ + (0,08/100)^2]^{(1/2)} = 0,053.$$

Donc $\Delta d^\circ = 0,053 \times 7,1 = 0,4^\circ$.

c. Le degré d'acidité du vinaigre étudié vaut donc $d^\circ = 7,1^\circ \pm 0,4^\circ$. La valeur de 7° indiquée par le fabricant est bien dans l'intervalle d'incertitude de celle trouvée expérimentalement.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : Réaliser et exploiter des dosages par étalonnage

1. **Faux.** Les incertitudes de mesure nécessitent la mesure de l'absorbance de plusieurs solutions étalons et le tracé d'une courbe d'étalonnage pour en déduire la concentration de la solution à doser.

2. **Faux.** D'après la loi de Kohlrausch, la courbe représentant la conductance en fonction de la concentration est une droite passant par l'origine car la conductance est proportionnelle à la conductivité. Un étalonnage du conductimètre n'est donc pas nécessaire.

3. **Faux.** Les mesures d'absorbance s'effectuent à une longueur d'onde donnée. Il faut qu'à cette longueur d'onde

de mesure, une seule espèce chimique absorbe la lumière. Il peut donc y avoir d'autres espèces chimiques colorées, mais qui absorbent à d'autres longueurs d'onde.

4. Vrai. Les solutions étalons contiendront cette paire d'ions à des concentrations connues.

2 1. a. D'après la loi de Beer-Lambert, on a $A = k \cdot c$ avec A l'absorbance de la solution (sans unité), c la concentration molaire de l'espèce colorée (en $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ par exemple) et k le coefficient de proportionnalité (en $\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$ par exemple).

b. Si la solution contient plusieurs espèces colorées, l'absorbance de la solution est la somme des absorbances dues à chaque espèce prise individuellement :

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + \dots$$

2. a. On a $\sigma = \lambda \cdot c$ avec σ la conductivité de l'ion (en $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$), c la concentration molaire de l'ion (en $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$ par exemple) et λ la conductivité ionique molaire de l'ion (en $\text{S} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$ par exemple).

b. D'après la loi de Kohlrausch, la conductivité d'une solution est la somme des conductivités de chaque ion présent : $\sigma_{\text{solution}} = \sum \lambda_i \cdot c_i$.

3. La conductance et la conductivité de la solution sont des grandeurs proportionnelles. La conductivité se mesure avec un conductimètre étalonné et la conductance se mesure avec un conductimètre qui n'est pas nécessairement étalonné.

3 1. On doit utiliser la loi de Kohlrausch :

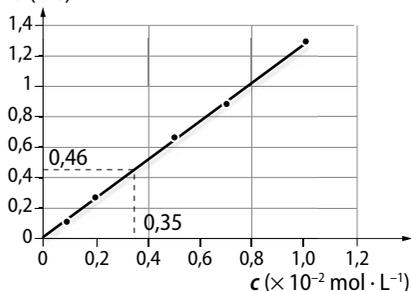
$$\sigma_{\text{solution}} = \sigma_1 + \sigma_2 + \dots = \sum \sigma_i = \sum \lambda_i \cdot c_i$$

avec σ_{solution} la conductivité de la solution en $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$, λ_i les conductivités ioniques molaires en $\text{S} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$ et c_i les concentrations molaires en $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$.

2.

Nom de la solution	Concentration molaire ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	Ions présents	Conductivité ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)
Chlorure de potassium	$1,0 \times 10^{-2}$	K^+, Cl^-	$(7,4 \times 10^{-3} + 7,6 \times 10^{-3}) \times 1,0 \times 10^{-2} \times 10^3 = 1,5 \times 10^{-1}$
Hydroxyde de sodium	0,002 00	Na^+, HO^-	$(5,0 \times 10^{-3} + 19,8 \times 10^{-3}) \times 0,002\ 00 \times 10^3 = 5,0 \times 10^{-2}$
Acide chlorhydrique	300×10^{-5}	$\text{H}_3\text{O}^+, \text{Cl}^-$	$(35,0 \times 10^{-3} + 7,6 \times 10^{-3}) \times 300 \times 10^{-5} \times 10^3 = 1,3 \times 10^{-1}$

4 1. et 2. G (mS)



La solution S a pour concentration $0,35 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

5 1. La conductivité de la solution vaut :

$$\sigma = \lambda_{\text{K}^+} \cdot [\text{K}^+] + \lambda_{\text{Cl}^-} \cdot [\text{Cl}^-] = (\lambda_{\text{K}^+} + \lambda_{\text{Cl}^-}) \cdot c_0$$

2. a. La conductivité σ de la solution est proportionnelle à c_0 . Si c_0 augmente, la conductivité de la solution augmente aussi.

b. Si le volume augmente, mais que la concentration ne change pas, la conductivité de la solution ne change pas.

6 1. Pour mesurer l'absorbance des solutions, on se place à une longueur d'onde proche de la longueur d'onde d'absorbance maximale, ce qui correspond, d'après le spectre d'absorbance de la caféine, à 271 nm.

2. D'après la loi de Beer-Lambert, l'absorbance est proportionnelle à la concentration, donc le graphe représentant l'absorbance en fonction de la concentration d'une espèce donnée est une droite passant par l'origine.

3. Le café qui contient le plus de caféine est celui dont la concentration massique en caféine est la plus élevée, ce qui correspond, d'après la courbe d'étalonnage, au café noté 2.

4. La solution qui a été utilisée pour tracer le spectre d'absorbance a une absorbance de 0,53 à 271 nm. D'après la courbe d'étalonnage, la solution qui a une absorbance de 0,5 à 271 nm a une concentration massique de $16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

COMPÉTENCE 2 : Comprendre le principe d'un titrage direct

7 1. Vrai.

2. Vrai. La réaction support de titrage doit être quantitative, il ne peut donc rester qu'un seul des deux réactifs titrant ou titré ; le réactif limitant doit disparaître.

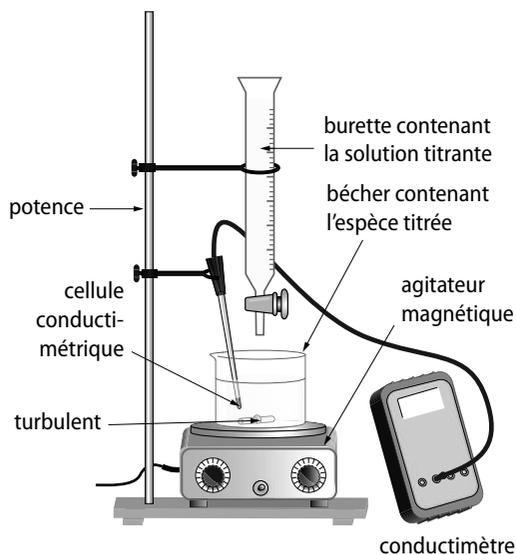
3. Faux. Le volume équivalent correspond au volume de solution titrante versé pour atteindre l'équivalence.

8 1. Un titrage direct sert à doser une espèce chimique par l'intermédiaire d'une transformation chimique. Un titrage est un type de dosage dans lequel l'espèce à doser subit une transformation chimique.

2. La réaction support de titrage doit être quantitative (elle doit être aussi rapide et unique).

3. L'équivalence d'un titrage correspond à l'état final du système pour lequel les réactifs titrant et titré ont été introduits en proportions stœchiométriques.

4. Montage de titrage conductimétrique :



COMPÉTENCE 3 : Repérer l'équivalence d'un titrage par colorimétrie, pH-métrie et conductimétrie

12 1. *Faux*, pour deux raisons. Premièrement, le volume équivalent est l'abscisse du point d'intersection des deux droites modélisant les points expérimentaux. Si la courbe $G(V)$ est décroissante puis croissante, ce point d'intersection n'a pas nécessairement la même abscisse que le point expérimental de conductance la plus faible. Deuxièmement, la conductance peut avoir une autre évolution que « décroissante-croissante ». La seule contrainte est qu'il y ait un changement de pente important à l'équivalence sur le graphe représentant G en fonction de V .

2. *Faux*. Seuls les titrages faisant intervenir une réaction acido-basique peuvent être suivis par pH-métrie. Seuls des titrages faisant intervenir des ions et présentant des pentes différentes à l'équivalence sur le graphe représentant G en fonction de V peuvent être suivis par conductimétrie. Seuls certains titrages peuvent être suivis par les deux méthodes.

3. *Faux*. Lorsque les espèces chimiques qui interviennent dans le titrage sont incolores, on peut parfois utiliser un indicateur coloré.

13 1. On peut suivre un titrage par colorimétrie si l'un des réactifs de la réaction support de titrage est coloré ou s'il existe un indicateur coloré adapté à cette réaction.

2. Lors d'un titrage pH-métrique, le volume équivalent se repère par la méthode des tangentes ou par la méthode de la dérivée.

3. Dans un titrage par conductimétrie, l'équivalence se repère par un changement de pente du graphe modélisé de la conductance en fonction du volume de solution titrante versé.

14 1. L'équation de la réaction support de titrage est :

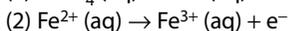
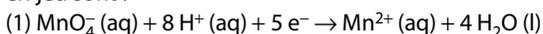
$$\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{HO}^-(\text{aq}) \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}(\text{l})$$

2. a. Le graphe du haut représente la conductance en mS en fonction du volume de solution titrante versée en mL lors du titrage conductimétrique. Celui du bas représente le pH (sans unité) en fonction du volume de solution titrante versée en mL lors du titrage pH-métrique.

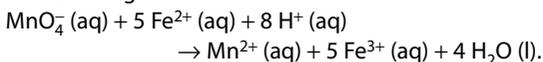
b. Pour le graphe du haut, il faut tracer les droites de régression et déterminer l'abscisse du point d'intersection de ces deux droites. Le volume équivalent vaut 10,0 mL. Sur le graphe du bas, la méthode des tangentes permet de trouver un volume équivalent de 10,0 mL.

3. Avant l'équivalence, on verse des ions hydroxyde et sodium, mais les ions hydroxyde réagissent avec les ions oxonium présents. Ainsi, tout se passe comme si

9 1. Les demi-équations électroniques des couples en jeu sont :



En faisant (1) + 5 × (2), on obtient l'équation de la réaction de titrage :



2. Avant l'équivalence, le réactif titrant est le réactif limitant, il est donc entièrement consommé, tandis que le réactif titré est en excès. À l'équivalence, les réactifs titrant et titré ont été introduits en proportions stœchiométriques, les deux sont donc entièrement consommés, et après l'équivalence, le réactif titrant est en excès. On a donc :

Avant l'équivalence	À l'équivalence	Après l'équivalence
$n(\text{Fe}^{2+}, \text{initial}) - 5x_{\text{max}} > 0$	$n(\text{Fe}^{2+}, \text{initial}) - 5x_{\text{max}} = 0$	$n(\text{Fe}^{2+}, \text{initial}) - 5x_{\text{max}} = 0$
$n(\text{MnO}_4^-, \text{versé}) - x_{\text{max}} = 0$	$n(\text{MnO}_4^-, \text{versé}) - x_{\text{max}} = 0$	$n(\text{MnO}_4^-, \text{versé}) - x_{\text{max}} > 0$
$5 n(\text{MnO}_4^-, \text{versé}) < n(\text{Fe}^{2+}, \text{initial})$	$5 n(\text{MnO}_4^-, \text{versé}) = n(\text{Fe}^{2+}, \text{initial})$	$5 n(\text{MnO}_4^-, \text{versé}) > n(\text{Fe}^{2+}, \text{initial})$

10 1. On note n_i les quantités de matière initialement présentes et n_E les quantités de matière versées à l'équivalence.

a. $n(\text{I}_2)_i = n(\text{S}_2\text{O}_3^{2-})_E/2$.

b. $n(\text{Fe}^{2+})_i/5 = n(\text{MnO}_4^-)_E$.

c. $n(\text{H}_2\text{O}_2)_i/5 = n(\text{MnO}_4^-)_E/2$.

2. a. $c \cdot V = c' \cdot V'_E/2$ donc $c = c' \cdot V'_E/(2 V)$.

b. $c \cdot V/5 = c' \cdot V'_E$ donc $c = 5 c' \cdot V'_E/V$.

c. $c \cdot V/5 = c' \cdot V'_E/2$ donc $c = 5 c' \cdot V'_E/(2 V)$.

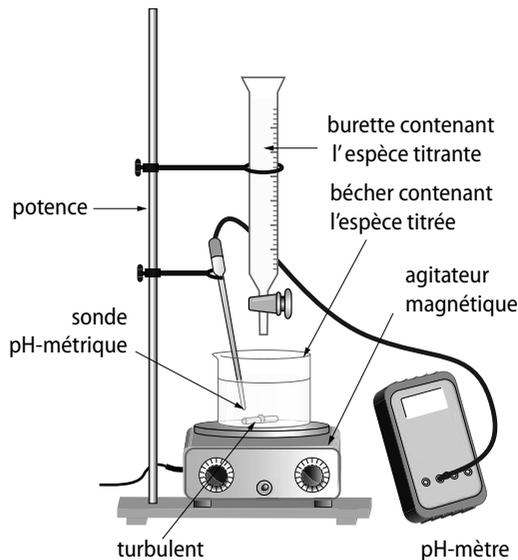
les ions oxonium présents dans le bécher étaient remplacés progressivement par des ions sodium, qui ont une conductivité moindre. Donc la conductivité diminue avant l'équivalence. Après l'équivalence, on continue de verser des ions hydroxyde et sodium, donc la conductivité de la solution augmente.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

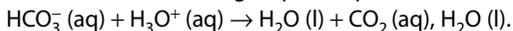
16 1. a. Le titrage a été suivi par pH-métrie.

b. La pipette jaugée sert à prélever la prise d'essai, solution à doser : c'est elle qu'il faut mettre initialement dans le bécher.

c. Montage de titrage pH-métrique :



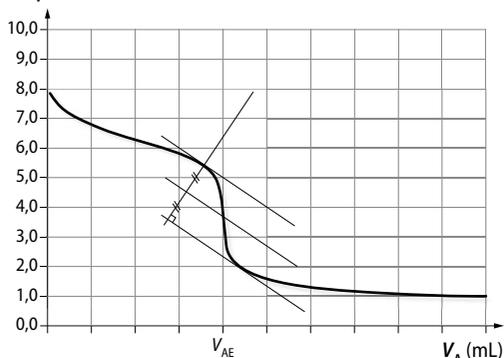
2. a. La réaction de titrage a pour équation :



b. D'après les coefficients stœchiométriques de l'équation de titrage, à l'équivalence, on a :

$$n_{\text{hydro}} = n(\text{H}_3\text{O}^+, \text{versé à l'équivalence}).$$

c. pH



D'après la méthode des tangentes, on trouve $V_{\text{AE}} = 8,0 \text{ mL}$.

- d.** On a donc $n_{\text{hydro}} = n(\text{H}_3\text{O}^+, \text{versé à l'équivalence}) = c_A V_{\text{AE}} = 0,40 \times 8,0 \times 10^{-3} = 3,2 \times 10^{-3} \text{ mol}$.
- e.** La concentration en hydrogénocarbonate est donc : $[\text{HCO}_3^-]_{\text{exp}} = n_{\text{hydro}}/V = 3,2 \times 10^{-3}/(20,0 \times 10^{-3}) = 0,16 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

L'écart relatif vaut :

$$\begin{aligned} & \frac{|[\text{HCO}_3^-]_{\text{exp}} - [\text{HCO}_3^-]_{\text{étiquette}}|}{[\text{HCO}_3^-]_{\text{étiquette}}} \\ &= \frac{|0,16 - 0,166|}{0,166} = 0,036 \\ &= 3,6 \% < 5 \%. \end{aligned}$$

Les deux valeurs trouvées sont concordantes.

17 1. On peut suivre le titrage par pH-métrie et déterminer le volume équivalent par la méthode des tangentes ou de la dérivée sur le graphe $\text{pH} = f(V)$. On peut également le suivre par conductimétrie et déterminer le volume équivalent qui correspond au volume pour lequel il y a rupture de pente sur le graphe $G(V)$.

2. Lors du prélèvement de la prise d'essai à la pipette, le volume se mesure avec une certaine incertitude ; les valeurs de conductance indiquées par le conductimètre contiennent une incertitude et le volume équivalent déterminé graphiquement également. Toutes ces sources d'incertitude font que tous les binômes ne trouvent pas exactement le même volume équivalent.

3. Le volume équivalent de 16,3 mL trouvé par le binôme 3 du groupe 1 est aberrant. Toutes les autres valeurs sont proches de 12 mL.

4. On trouve $V_{\text{Emoy}} = 12,02 \text{ mL}$ et $\sigma = 0,46 \text{ mL}$.

5. On calcule $\Delta V_E = 2\sigma = 0,92 \text{ mL}$.

6. Ainsi, on a $V_E = 12,02 \pm 0,92 \text{ mL}$.

7. Le résultat peut donc être donné avec trois chiffres significatifs : $V_E = 12,0 \text{ mL}$, avec incertitude sur le chiffre des dixièmes.

18 1. Voir figure 3 du cours.

2. $\text{HA} (\text{aq}) + \text{HO}^- (\text{aq}) \rightarrow \text{A}^- (\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} (\text{l})$.

Cette réaction doit être quantitative.

3. D'après la courbe de suivi de titrage, le pH à l'équivalence vaut 8,0. On choisit un indicateur coloré dont la zone de virage contient ce pH : le rouge de crésol convient.

4. a. L'équivalence est l'état final du système pour lequel les réactifs titrant et titré ont été introduits en proportions stœchiométriques.

b. La méthode des tangentes permet de trouver $V_{\text{BE}} \approx 14,5 \text{ mL}$.

5. Soit $n(\text{AH})_i$ la quantité de matière de AH à doser et $n(\text{HO}^-)_E$ la quantité de matière d'ions HO^- versée à l'équivalence.

$$\begin{aligned} n(\text{AH})_i &= n(\text{HO}^-)_E = c_B \cdot V_{\text{BE}} \\ &= 2,00 \times 10^{-2} \times 14,4 \times 10^{-3} = 2,88 \times 10^{-4} \text{ mol}. \end{aligned}$$

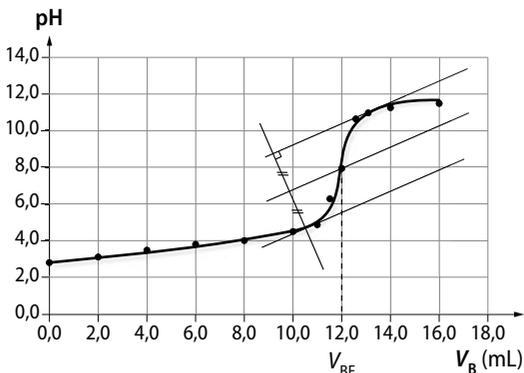
6. Dans la fiole jaugée de 100,0 mL, il y avait une quantité de matière de AH égale $10 n(\text{AH})_i$.

D'où $m = 10 n(\text{AH})_i \cdot M(\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6)$.

$$m = 2,88 \times 10^{-3} \times 176 = 507 \text{ mg} \approx 500 \text{ mg.}$$

L'indication du fabricant « vitamine C 500 » indique qu'un comprimé de vitamine C contient 500 mg d'acide ascorbique.

19 1. La méthode des tangentes donne un volume équivalent $V_{\text{BE}} = 12 \text{ mL}$ (on ne peut pas vraiment être plus précis que cela).



2. a. L'équivalence est l'état final du système pour lequel les réactifs titrant et titré ont été introduits en proportions stœchiométriques.

b. À l'équivalence, on a ici $c_A \cdot V_A = c_B \cdot V_{\text{BE}}$.

c. On a $c_A = c_B \cdot V_{\text{BE}}/V_A$
 $= 5,00 \times 10^{-2} \times 12 \times 10^{-3} / (20,0 \times 10^{-3})$
 $= 3,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

d. On a $m_A(1 \text{ L}) = n_A(1 \text{ L}) \cdot M = (c_A \cdot V(1 \text{ L})) \cdot M$
 $= 3,00 \times 10^{-2} \times 90,0 = 2,7 \text{ g.}$

3. a. L'acidité du lait est $2,7/10 = 27 \text{ }^\circ\text{D}$.

b. L'acidité du lait est supérieure à $18 \text{ }^\circ\text{D}$: le lait dosé n'est donc pas frais.

20 1. a. On ajoute 150 mL d'eau distillée pour que la cellule conductimétrique plonge correctement dans la solution et pour pouvoir négliger l'effet de dilution sur la conductance lors du dosage.

b. Voir corrigé de l'exercice 8, question 4.

c. On doit réaliser une dilution au vingtième : le rapport entre les volumes des solutions mère et fille doit donc être de 20. On peut prélever 5,0 mL de solution commerciale avec une pipette jaugée de 5 mL et les introduire dans une fiole jaugée de 100,0 mL, puis compléter jusqu'au trait de jauge en prenant soin de mélanger pour homogénéiser lorsque la fiole est à moitié remplie.

2. a. La réaction de titrage a pour équation $\text{CH}_3\text{COOH}(\text{aq}) + \text{HO}^-(\text{aq}) \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^-(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l})$.

b. Avant l'équivalence, on ajoute en solution des ions hydroxyde et des ions sodium. Les ions hydroxyde réagissent avec l'acide acétique (qui ne conduit pas le cou-

rant) pour former des ions éthanoate, donc s'ajoutent à la conductivité initiale de la solution, celle des ions sodium et celle des ions éthanoate, qui sont toutes deux faibles. Donc la conductance de la solution augmente, mais faiblement. Après l'équivalence, on ajoute des ions hydroxyde qui restent en solution et qui ont une conductivité très importante, et des ions sodium. Donc la conductance de la solution augmente de manière plus importante.

c. Le volume équivalent correspond sur le graphe à l'abscisse du point d'intersection des droites modélisant les points expérimentaux avant et après l'équivalence. On trouve $V_E = 12 \text{ mL}$ (on ne peut pas réellement être plus précis que cela).

d. À l'équivalence, on a ici, d'après les coefficients stœchiométriques de l'équation de titrage : $c_{\text{Ad}} \cdot V_A = c_B \cdot V_E$.
 Donc $c_{\text{Ad}} = c_B \cdot V_E/V_A = 5,0 \times 10^{-2} \times 12 \times 10^{-3} / (10,0 \times 10^{-3})$
 $= 6,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

e. On a donc $c_A = 20 \cdot c_{\text{Ad}} = 20 \times 6,0 \times 10^{-2} = 1,2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

3. a. On a $m_A(100 \text{ g}) = n_A(100 \text{ g}) \cdot M = (c_A \cdot V(100 \text{ g})) \cdot M$
 $= (1,2 \times 100 \times 10^{-3}) \times 60,0 = 7,2 \text{ g.}$

Le vinaigre étudié a donc une acidité de $7,2^\circ$.

b. L'écart relatif vaut $|7 - 7,2|/7 = 2,9\% < 5\%$. Les deux valeurs sont concordantes.

EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

21 1. On a $n_D = [\text{I}_2] \cdot V = 2,0 \times 10^{-2} \times 20,0 \times 10^{-3}$
 $= 4,0 \times 10^{-4} \text{ mol}$ de diode introduit.

2. La solution restant colorée, le diiode est en excès, donc le glucose est en défaut : c'est le réactif limitant.

3. Les nombres stœchiométriques devant le diiode et devant le glucose étant les mêmes dans l'équation de la réaction de titrage, on peut dire que la quantité de matière de glucose ayant réagi est la même que celle de diiode ayant réagi. On a donc $n_G = n_D - n_R$.

4. a. Il s'agit d'une courbe d'étalonnage.

b. Cette courbe représentant une droite passant par l'origine, elle indique que A est proportionnelle à $[\text{I}_2]$.

c. D'après la courbe d'étalonnage, on a :

$$[\text{I}_2] = 3,0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

Ainsi, $n_R = [\text{I}_2] \cdot V = 3,0 \times 10^{-3} \times 50 \times 10^{-3} = 1,5 \times 10^{-4} \text{ mol}$.

d. On a $n_G = n_D - n_R = n_G = 4,0 \times 10^{-4} - 1,5 \times 10^{-4}$
 $= 2,5 \times 10^{-4} \text{ mol}$.

5. Dans $2,0 \text{ cm}^3$ de jus de fruit, il y a $n_G = 2,5 \times 10^{-4} \text{ mol}$ de glucose.

Dans 1 L soit $1\,000 \text{ cm}^3$ de jus de fruit, il y a n'_G mol de glucose.

$$n'_G = \frac{1000 \times 2,5 \times 10^{-4}}{2} = 1,3 \times 10^{-1} \text{ mol de glucose dans}$$

1 L de jus de fruit.

Ainsi, $m_G = n'_G \cdot M_G = 0,125 \times 180 = 23 \text{ g}$ de glucose dans 1 L de jus de fruit.

Stratégie de la synthèse organique

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
<p>Stratégie de la synthèse organique</p> <p>– Protocole de synthèse organique :</p> <ul style="list-style-type: none"> • identification des réactifs, du solvant, du catalyseur, des produits ; • détermination des quantités des espèces mises en jeu, du réactif limitant ; • choix des paramètres expérimentaux : température, solvant, durée de la réaction, pH ; • choix du montage, de la technique de purification, de l'analyse du produit ; • calcul d'un rendement ; • aspects liés à la sécurité ; • coûts. 	<p>– Effectuer une analyse critique de protocoles expérimentaux pour identifier les espèces mises en jeu, leurs quantités et les paramètres expérimentaux.</p> <p>– Justifier le choix des techniques de synthèse et d'analyse utilisées.</p> <p>– Comparer les avantages et les inconvénients de deux protocoles.</p>
<p>Sélectivité en chimie organique</p> <p>– Composé polyfonctionnel : réactif chimiosélectif, protection de fonctions.</p>	<p>– Extraire et exploiter des informations :</p> <ul style="list-style-type: none"> • sur l'utilisation de réactifs chimiosélectifs ; • sur la protection d'une fonction dans le cas de la synthèse peptidique, <p>pour mettre en évidence le caractère sélectif ou non d'une réaction.</p> <p>– Pratiquer une démarche expérimentale pour synthétiser une molécule organique d'intérêt biologique à partir d'un protocole.</p> <p>– Identifier des réactifs et des produits à l'aide de spectres et de tables fournis.</p>

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Analyser des protocoles expérimentaux.
2. Justifier le choix des techniques lors d'une synthèse.
3. Mettre en évidence le caractère sélectif ou non d'une réaction.

Évaluation diagnostique

p. 486

SITUATION 1

Fabriquer des molécules à moindre coût, en grande quantité et dans des délais relativement courts pour répondre aux besoins de la société nécessite un travail de longue haleine pour les ingénieurs chimistes : l'efficacité d'une réaction est « mesurée » en faisant varier les divers paramètres qui régissent le système réactionnel

comme les quantités de matières initiales, la température, la pression, etc. afin de trouver la combinaison qui rendra la synthèse optimale. **L'activité 1** montre comment des choix de paramètres expérimentaux différents influent sur le rendement d'une même synthèse.

SITUATION 2

Les montages représentés sont :

- le montage d'un chauffage à reflux : le milieu réactionnel est chauffé (pour accélérer la réaction) dans un ballon muni d'un réfrigérant à eau. Ce dernier permet de condenser les vapeurs issues du milieu réactionnel et de travailler sans perte de matière (réactifs et produits) par évaporation ;
- une extraction liquide-liquide à l'aide d'une ampoule à décanter : on l'utilise en général pour séparer deux phases liquides non miscibles dont l'une contient

l'espèce chimique désirée. La phase la moins dense se situe toujours au-dessus de la phase la plus dense. À l'aide du robinet, on récupère alors la phase souhaitée. D'autres savoir-faire expérimentaux, mis en œuvre lors des synthèses, seront étudiés dans les **activités 1 et 3**.

SITUATION 3

Le para-aminophénol porte deux groupes d'atomes caractéristiques : un groupe amine et un groupe hydroxyle. Le paracétamol lui aussi porte deux groupes d'atomes caractéristiques : un groupe amide et un groupe hydroxyle. Pour synthétiser ce dernier à partir du premier, le chimiste doit :
 – utiliser une espèce chimique qui va réagir sélectivement avec le groupe amine ;
 – faire en sorte de protéger le groupe à préserver si l'espèce chimique peut réagir avec les différents groupes. Les **activités 2 et 3** abordent sur deux exemples précis (la synthèse du paracétamol et la synthèse peptidique) les deux cas de figure envisagés.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

Quelle voie de synthèse ?

p. 488

1. a. Les réactifs sont :

- le butan-1-ol et l'acide éthanoïque (synthèse n° 1) ;
- le butan-1-ol et l'anhydride éthanoïque (synthèse n° 2).

b. La quantité de matière présente dans un volume V de chaque espèce chimique à l'état liquide et de densité d vaut donc $n = \frac{d \cdot \rho_{\text{eau}} \cdot V}{M}$ avec $\rho_{\text{eau}} = 1,0 \text{ g} \cdot \text{mL}$;

V en mL, M en $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

$$n_{\text{butan-1-ol}} = 1,6 \times 10^{-1} \text{ mol} ;$$

$$n_{\text{acide éthanoïque}} = 1,6 \times 10^{-1} \text{ mol} ;$$

$n_{\text{anhydride éthanoïque}} = 1,6 \times 10^{-1} \text{ mol}$ (on constate que les mélanges sont équimolaires).

2. Un catalyseur est une espèce chimique qui permet d'accélérer une réaction en intervenant dans le mécanisme de la réaction mais qui est intégralement reformé en fin de réaction.

3. L'erenmeyer utilisé doit être sec afin de ne pas décomposer l'anhydride éthanoïque en acide éthanoïque, ce qui reviendrait à réaliser la voie 1 à nouveau !

4. a. Athermique : qui ne libère pas globalement d'énergie sous forme de chaleur.

Exothermique : qui libère globalement de l'énergie sous forme de chaleur.

b. Lors de la synthèse n° 1, on porte le milieu réactionnel à ébullition, ce qui générera une grande quantité de matière à l'état de vapeur : un réfrigérant au fort pouvoir condensant est donc nécessaire, on va utiliser un réfrigérant à eau.

La synthèse n° 2 se fait à une température très inférieure à celle des températures d'ébullition des diffé-

rentes espèces chimiques, elle ne générera que très peu de matière à l'état gazeux : un simple réfrigérant à air suffit dans ce cas.

5. Dans les deux cas, la quantité de matière théorique en éthanoate de butyle obtenue est :

$$n_{\text{éthanoate de butyle}} = 1,6 \times 10^{-1} \text{ mol.}$$

Soit une masse $m = n_{\text{éthanoate de butyle}} \cdot M = 18,6 \text{ g}$.

6. a. Le rendement de la synthèse est :

$$R = \frac{n_{\text{réel}}}{n_{\text{théorique}}} = \frac{m_{\text{réelle}}}{m_{\text{théorique}}}$$

donc $R_1 = 0,48 = 48 \%$ et $R_2 = 0,89 = 89 \%$.

b. La différence s'explique par le fait que la réaction mise en jeu lors de la synthèse 1 est réversible, c'est-à-dire que l'éthanoate de butyle réagit avec l'eau pour reformer le butan-1-ol et l'acide éthanoïque, la synthèse est donc limitée.

7. La voie de synthèse 2 est donc la plus rentable industriellement.

ACTIVITÉ 2

Synthèse peptidique

p. 489

1. a. Les acides α -aminés portent les groupes d'atomes caractéristiques :

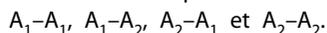
- amine : $-\text{NH}_2$;
- carboxyle : $-\text{COOH}$.

b. Les deux groupes précédents confèrent à la molécule les propriétés des amines et celles des acides carboxyliques, on dit quelle porte une fonction amine et acide carboxylique, d'où le nom de molécule polyfonctionnelle.

2. a. Le carbone fonctionnel du groupe carboxyle est un site accepteur de doublet d'électrons : les liaisons carbone-oxygène sont polarisées, l'électronégativité de l'atome d'oxygène étant supérieure à celle de l'atome de carbone. L'atome d'azote du groupe amine porteur d'un doublet libre est un site donneur de doublet d'électrons.

b. La condensation est une réaction de substitution : le nombre de molécules ne varie pas entre réactifs et produits.

3. Les quatre acides aminés possibles sont :

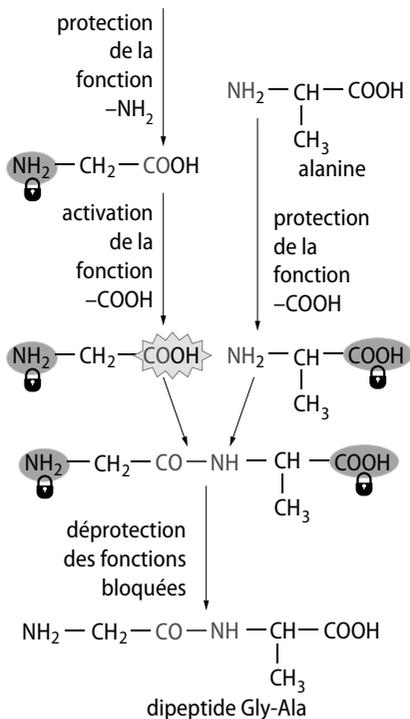
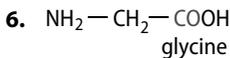


4. a. On doit protéger la fonction amine de la glycine : on procède donc en premier lieu au blocage de cette fonction en faisant réagir la glycine avec le tertio-butylcarbonyle.

b. On doit d'autre part protéger aussi la fonction acide carboxylique de l'alanine : on procède au blocage en la faisant réagir avec le méthanol (*estérification de la fonction acide*).

c. Pour améliorer le rendement, on doit aussi activer la fonction acide carboxylique de la glycine par le chlore de thionyle (*transformation de la fonction acide carboxylique à la fonction chlorure d'acyle plus réactive*).

5. Il faut ensuite débloquent les fonctions bloquées en réalisant une hydrolyse acide douce (pour ne pas détruire la liaison peptidique formée).



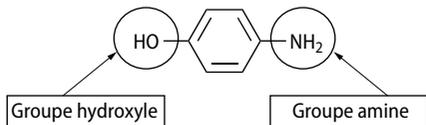
ACTIVITÉ 3

Une synthèse sélective

p. 490

• Étude de la réaction

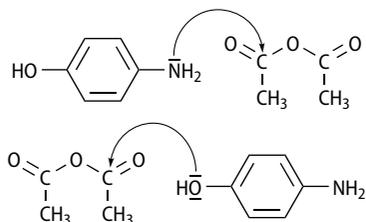
1. a.



b. Les atomes d'oxygène et d'azote sont tous deux porteurs de doublets d'électrons libres, ce sont donc des sites donneurs de doublet d'électrons potentiels.

2. a. Les atomes de carbone liés aux atomes d'oxygène sont des sites accepteurs d'électrons, les liaisons carbone-oxygène étant polarisées car les atomes d'oxygène sont plus électronégatifs que les atomes de carbone.

b. On peut donc envisager les deux mécanismes initiaux :

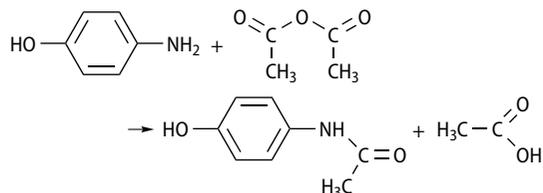


3. a. Pour la molécule A : le groupe amine a disparu et le groupe hydroxyle est maintenu. Pour la molécule B, c'est l'inverse.

b. Dans la molécule A, il apparaît le groupe d'atomes caractéristique —NH—CO— des amides et dans la molécule B, le groupe d'atomes caractéristique —O—CO— des esters.

4. Le spectre du para-aminophénol présente les bandes caractéristiques des amines (N—H vers $1\,625\text{ cm}^{-1}$ et $1\,200\text{ cm}^{-1}$) alors que celui du paracétamol présente les bandes d'absorption caractéristique des amides (groupe C=O vers $1\,650\text{ cm}^{-1}$ et N—H vers $3\,200\text{ cm}^{-1}$) : on peut en déduire que le groupe amine a disparu et que le groupe amide s'est formé. Le paracétamol est donc la molécule A.

5. L'équation de la synthèse est donc :



6. Le caractère donneur de doublet d'électrons de l'atome d'azote est donc supérieur à celui de l'atome d'oxygène.

• Exploitation du protocole

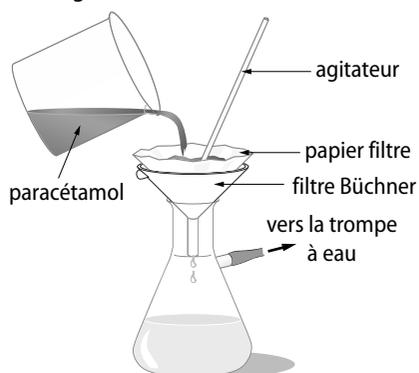
1. a. En raison de leur dangerosité (toxicité et caractère corrosif), les réactifs doivent être prélevés avec port de gants, lunettes de protection et blouse et manipulés sous la hotte.

b. L'acide éthanóïque est le solvant du milieu réactionnel, il permet la dissolution du para-aminophénol solide.

2. La température de chauffe étant basse et la durée de chauffage courte, peu de vapeur s'échappera du milieu réactionnel : un simple réfrigérant à air suffira pour les condenser.

3. La solubilité du paracétamol dans l'eau diminue lorsque la température de cette eau diminue : dans l'eau froide, il cristallise.

4. a. Montage de filtration sur Büchner :



b. La filtration sous pression réduite s'effectue beaucoup plus rapidement, elle est plus performante.

5. a. Le solvant utilisé pour la recristallisation est l'eau.

b. Les impuretés doivent être plus solubles à froid dans l'eau que le paracétamol.

c. Trop d'eau allongerait la durée de la cristallisation, et il resterait une plus grande quantité de paracétamol à l'état dissous.

6. La mesure de la température de fusion du paracétamol purifié donne $\theta \approx 167^\circ\text{C}$, ce qui correspond pratiquement à celle des tables : le produit obtenu est donc pur.

7. a. $n_{\text{para-aminophénol}} = m/M = 5,0 \times 10^{-2} \text{ mol}$.

$$n_{\text{anhydride}} = \frac{\rho \cdot V}{M} = 7,4 \times 10^{-2} \text{ mol}.$$

b. La réaction se faisant mole à mole, le réactif limitant est celui dont la quantité de matière est initialement la plus petite : le para-aminophénol est limitant et l'avancement maximal de cette réaction est $x_{\text{max}} = 5,0 \times 10^{-2} \text{ mol}$. La quantité de matière de paracétamol théoriquement obtenue est $n_{\text{paracétamol}} = x_{\text{max}} = 5,0 \times 10^{-2} \text{ mol}$, la masse de paracétamol est donc $m = n \cdot M = 7,6 \text{ g}$.

c. La masse de paracétamol réellement obtenue est de 6,8 g. Le rendement de la transformation est donc :

$$R = \frac{n_{\text{réel}}}{n_{\text{théorique}}} = \frac{m_{\text{réelle}}}{m_{\text{théorique}}} = 0,89 = 89 \%$$

Le rendement est inférieur à 100 % à cause, entre autre, des pertes de matière lors des différentes étapes d'extraction et de purification.

8. La synthèse réalisée est bien une synthèse sélective puisqu'un seul groupe d'atomes caractéristique du para-aminophénol a réagi au cours de la réaction.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : Analyser des protocoles expérimentaux

1. **1.** Vrai.

2. **Faux.** Il permet d'accélérer la réaction en agissant sur le facteur température sans perdre de la matière par évaporation.

3. **Vrai.**

4. **Faux.** Le pH fait partie des paramètres expérimentaux de la synthèse.

2. L'ordre des étapes de la synthèse de l'aspirine est : D-B-A-E-C

3. **1.** Les différentes étapes sont :

– réaction : « Dans un ballon ... pendant une heure » ;

– extraction : « Après refroidissement ... la phase contenant l'ester » ;

– purification : « On la soumet à une distillation fractionnée ».

2. Il faut connaître la densité d de l'alcool : la densité est liée à sa masse volumique par $\rho = d \cdot \rho_{\text{eau}}$.

3. Les facteurs cinétiques sont :

– présence d'un catalyseur (acide sulfurique) ;

– élévation de la température par chauffage.

4. Pour récupérer la phase contenant uniquement l'ester, il faut connaître la densité de ce dernier.

Pour récupérer l'ester seul, il faut connaître sa température d'ébullition.

5. Plusieurs techniques sont possibles :

– mesure de l'indice de réfraction ;

– spectres infrarouge et RMN.

4. **1.** L'anhydride éthanoïque est corrosif : manipulation avec blouse, gants et lunettes de protection. L'aniline est toxique et polluante : manipulation avec gants et sous la hotte, l'excès est récupéré dans des flacons spécifiques.

2. L'eau décomposerait l'anhydride éthanoïque

3. Il se produit une réaction acido-basique conduisant à la formation d'ions $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_3^+$ solubles dans l'acide.

4. **a.** Pour l'aniline :

$$n = m/M = \rho \cdot V/M = 1,1 \times 10^{-1} \text{ mol}.$$

Pour l'anhydride :

$$n = m/M = \rho \cdot V/M = 1,6 \times 10^{-1} \text{ mol}.$$

b. Le réactif limitant est l'aniline.

5. **1.** $n_{\text{acide}} = m_{\text{acide}}/M_{\text{acide}} = 1,67 \times 10^{-1} \text{ mol}$.

$$n_{\text{alcool}} = n_{\text{acide}} \text{ d'où } V_{\text{alcool}} = n_{\text{alcool}} \cdot M_{\text{alcool}}/\rho_{\text{alcool}} = 17,3 \text{ mL}.$$

2. **a.** $n_{\text{ester}} = \rho_{\text{ester}} \cdot V_{\text{ester}}/M_{\text{ester}} = 1,12 \times 10^{-1} \text{ mol}$.

b. La quantité de matière n_{th} d'ester théoriquement obtenue est $n_{\text{th}} = n_{\text{acide}} = 1,67 \times 10^{-1} \text{ mol}$.

Le rendement est $R = n_{\text{ester}}/n_{\text{th}} = 0,671 = 67,1 \%$.

c. L'écriture de la réaction montre qu'il s'agit d'un équilibre. De plus, il y a toujours des pertes de matière lors des différentes étapes d'extraction et de purification.

COMPÉTENCE 2 : Justifier le choix des techniques lors d'une synthèse

6. **1.** Vrai. Pour choisir correctement le réfrigérant.

2. **Vrai.**

3. **Faux.** Elle sépare des mélanges homogènes de liquides miscibles entre eux.

4. **Vrai.**

5. **Faux.** Il sert à éliminer les traces d'eau après le lavage.

7. **a.** Pour séparer une espèce solide d'un liquide, il faut réaliser une filtration simple par gravité (entonnoir

et papier filtre) ou une filtration sous pression réduite (filtre Büchner).

b. Pour séparer deux liquides non miscibles, on va réaliser une décantation dans une ampoule à décanter et récupérer la phase désirée. La connaissance des densités des liquides est nécessaire pour repérer les phases.

c. Pour séparer deux liquides miscibles, il faut jouer sur la température du milieu réactionnel pour atteindre la température d'ébullition du liquide le plus volatil : les dispositifs utilisés sont des montages de distillation (ou un évaporateur rotatif).

8 a. L'identification d'une espèce chimique pure à l'état solide se fait souvent par la mesure de sa température de fusion à l'aide d'un banc Kofler.

b. L'identification d'une espèce chimique pure à l'état liquide se fait par mesure de sa densité, de son indice de réfraction.

Dans les deux cas, la réalisation des spectres IR et RMN est envisageable.

10 1. Une réaction athermique est une réaction dont le bilan énergétique est nul : elle ne libère pas de chaleur. Une réaction exothermique libère de la chaleur dans l'environnement.

2. Le chauffage a pour but d'élever la température du milieu réactionnel afin d'accélérer les réactions chimiques qui s'y produisent (facteur cinétique).

3. Schéma **c** = synthèse 1 : il faut augmenter fortement la température du milieu pour favoriser la réaction.

Schéma **a** = synthèse 2 : le chauffage au bain-marie suffit à maintenir la température déjà élevée par la réaction elle-même.

Schéma **b** = synthèse 3 : le chauffage n'est pas nécessaire, au contraire il faut diminuer la température en maintenant le ballon dans un bain de glace. L'ajout d'un des réactifs se fait progressivement pour éviter une élévation de température trop brutale (sécurité).

COMPÉTENCE 3 : Mettre en évidence le caractère sélectif ou non d'une réaction

11 1. b.

2. b.

12 a. La fonction cétone disparaît, une fonction alcool apparaît à la place, la fonction ester n'est pas modifiée : le réactif utilisé est chimiosélectif.

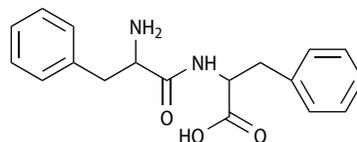
b. Les fonctions cétone et ester disparaissent, des fonctions alcool apparaissent à leur place : le réactif utilisé n'est pas chimiosélectif.

c. La fonction alcool n'est pas touchée, la fonction amine disparaît, une fonction amide apparaît à sa place : le réactif utilisé est chimiosélectif.

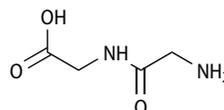
13 1. Présence d'un groupe amine $-NH_2$, d'un groupe amide $-CO-NH-$ et d'un groupe carboxyle $-COOH$.

2. Le groupe carboxyle de la phénylalanine et le groupe amine de la glycine ont réagi.

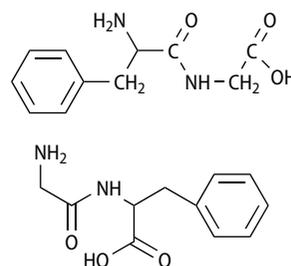
3. On pourrait envisager la formation de 4 dipeptides :
– à partir de deux phénylalanines



– à partir de deux glycines



– à partir de la phénylalanine et de la glycine



et

4. La réaction entre eux acides aminés n'est pas chimiosélective.

14 1. a. L'aniline porte un groupe d'atomes caractéristique amine $-NH_2$.

b. La 4-nitroaniline porte les groupes d'atomes caractéristiques amine $-NH_2$ et nitro $-NO_2$.

2. a. Non, car le groupe amine disparaîtrait et serait modifié en groupe nitro.

b. L'étape 1 de la synthèse est une étape de protection du groupe amine en le transformant en groupe amide non réactif avec l'acide nitrique.

c. L'étape 2 est une réaction chimiosélective puisque le groupe amide n'est pas modifié par l'acide nitrique.

d. L'étape 3 est une étape de déprotection : on revient au groupe amine par hydrolyse basique du groupe amide.

15 1. La molécule initiale porte un groupe carbonyle (fonction cétone ici) et un groupe nitro.

La molécule synthétisée porte un groupe carbonyle (fonction cétone ici) et le groupe amine.

2. a. Non car il réagirait indépendamment sur les deux groupes d'atomes caractéristiques en les réduisant.

b. Il faut ici protéger le groupe carbonyle.

- c. 1°) Protection de la fonction cétone par action de l'éthan-1,2-diol sur la molécule initiale.
 2°) Action de LiAlH_4 sur la molécule protégée (réduction du groupe NO_2 en NH_2).
 3°) Hydrolyse acide de la molécule précédemment obtenue et reformation du groupe carbonyle initial.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

16 1. $n_{\text{acide}} = n_{\text{alcool}} = d_{\text{alcool}} \cdot \rho_{\text{eau}} \cdot V_{\text{alcool}} / M_{\text{alcool}}$
 $= 4,3 \times 10^{-1} \text{ mol.}$

2. L'acide sulfurique est un catalyseur : il accélère la réaction.

3. Deux phases : une phase supérieure (moins dense), la phase organique, contenant le méthanoate d'éthyle ; une phase inférieure (plus dense), la phase aqueuse, contenant l'acide éthanóique, l'alcool, l'eau et les ions.

4. La quantité de matière théorique obtenue est égale à la quantité de matière d'alcool initiale, soit $4,3 \times 10^{-1} \text{ mol.}$

La réaction se fait en effet mole à mole. La masse théorique d'ester obtenue est donc : $m_{\text{th}} = 32 \text{ g.}$

5. Soit m_{ester} la masse d'ester obtenue.

Le rendement est :

$$R_1 = m_{\text{ester}} / m_{\text{th}} = 21 / (4,3 \times 10^{-1} \times 74) = 0,66 = 66 \%$$

6. a. Le montage permet une distillation fractionnée.

b. Le méthanoate d'éthyle est distillé au fur et à mesure de sa formation : il ne peut donc réagir avec l'eau et conduire à un équilibre qui limite le rendement.

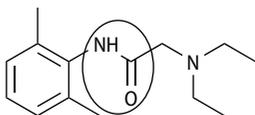
c. Il faut seulement distiller le produit formé sans distiller les réactifs.

7. a. $m'_{\text{ester}} = d_{\text{ester}} \cdot \rho_{\text{eau}} \cdot V' = 29 \text{ g.}$

b. $R_2 = m'_{\text{ester}} / m_{\text{th}} = 0,90 = 90 \%$

c. Le rendement est supérieur avec le second montage.

17 1. Lidocaïne



2. a. Voir figure 2 p. 493 du manuel.

b. Le chauffage à reflux permet d'augmenter la température, qui est un facteur cinétique, sans perte de matière. La transformation est alors plus rapide.

3. La réaction est terminée à la date $t = 60 \text{ min.}$ A est totalement consommé, il n'y a plus que de la lidocaïne dans le milieu réactionnel.

4. Le sulfate de magnésium anhydre est un agent desséchant : il permet d'éliminer les traces d'eau éventuellement présentes dans la phase organique.

5. Pour évaporer la totalité du pentane, la température doit être supérieure à la température d'ébullition du pentane, soit $T > 36 \text{ °C.}$

Pour cristalliser la lidocaïne, la température doit être inférieure à la température de fusion de la lidocaïne, soit $T < 68 \text{ °C.}$

La gamme de température est donc $36 \text{ °C} < T < 68 \text{ °C.}$

6. a. La quantité de matière initiale de A est :

$$n_1 = n/M = 2,0 \times 10^{-2} \text{ mol} = 20 \text{ mmol.}$$

La quantité de matière initiale de diéthylamine est :

$$n_2 = \rho_2 \cdot V_2 / M_2 = 9,68 \times 10^{-2} \text{ mol} = 96,8 \text{ mmol.}$$

b.	A + diéthylamine → lidocaïne + HCl			
État initial	n_1	n_2	0	0
État final	$n_1 - x_f$	$n_2 - x_f$	x_f	x_f
État final si totale	$n_1 - x_{\text{max}}$	$n_2 - x_{\text{max}}$	x_{max}	x_{max}

Si A est totalement consommé $n_1 - x_{\text{max}} = 0$, soit $x_{\text{max}} = n_1 = 20 \text{ mmol}$ et si la diéthylamine est totalement consommée $n_2 - x_{\text{max}} = 0$, soit $x_{\text{max}} = n_2 = 96,8 \text{ mmol.}$ Donc $x_{\text{max}} = 20 \text{ mmol.}$

Si la transformation est totale, d'après le tableau :

$$n_{\text{lidocaïne}} = x_{\text{max}} = 20 \text{ mmol de lidocaïne.}$$

c. Expérimentalement :

$$n_{\text{lidocaïne}} = 1,6 \times 10^{-2} \text{ mol} = 16 \text{ mmol.}$$

d. Rendement :

$$R = n_{\text{lidocaïne expérimental}} / n_{\text{lidocaïne théorique}} = 0,80 = 80 \%$$

18 1. a. **c** chauffe-ballon qui permet de maintenir la température du milieu réactionnel élevée.

b ballon qui contient le milieu réactionnel.

a réfrigérant à eau qui permet de condenser les vapeurs issues du milieu réactionnel.

b. On chauffe pour accélérer la transformation.

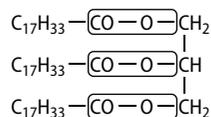
2. L'éthanol est le solvant de la synthèse : la solution aqueuse de soude et l'huile sont non miscibles. En revanche, elles le sont toutes les deux dans l'éthanol : la réaction sera donc favorisée en milieu alcoolique.

3. La solubilité du savon diminue avec la température et est très faible dans l'eau salée : le savon précipite alors.

4. La filtration sous vide est plus performante.

5. Il faudrait purifier le savon en éliminant les traces de soude et d'alcool.

6. La molécule comporte trois groupes d'atomes caractéristiques des esters.



7. Les sites accepteurs de doublet d'électrons sont les carbones du groupe caractéristique ester, les sites donateurs de doublet d'électrons sont les atomes d'oxygène de l'ion hydroxyde.

8. a. $n_{\text{oléine}} = V \cdot d \cdot \rho_{\text{eau}} / M_{\text{pl}} = 2,0 \times 10^{-2} \text{ mol.}$

$$n_{\text{soude}} = c \cdot V / M = 5,0 \times 10^{-2} \text{ mol.}$$

b. $n_{\text{soude}}/3 < n_{\text{oléine}}$ la soude est le réactif limitant et l'avancement maximal est $x_{\text{max}} = n_{\text{soude}}/3$.

c. $n_{\text{savon}} = 3 x_{\text{max}} = n_{\text{soude}} = 5,0 \times 10^{-2}$ mol.

$m_{\text{savon}} = n_{\text{savon}} \cdot M_{\text{savon}} = 15,2$ g.

9. Rendement : $R = m_{\text{savon réelle}}/m_{\text{savon théorique}} = 0,69 = 69\%$.

EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

19 1. a. Pour le protocole 1 :

– réaction : « Dans un ballon ... solution acidifiée de concentration $0,25 \text{ mol} \times \text{L}^{-1}$ » ;

– extraction/purification : « Ajouter 20 mL ... synthétisée ».

Pour le protocole 2 :

– réaction : « Dans un ballon ... solution de concentration $0,25 \text{ mol} \times \text{L}^{-1}$ » ;

– extraction : « Au bout de 10 min ... pH voisin de 1 ».

b. Les réactifs sont identiques dans les deux synthèses. En revanche, le pH du milieu est différent (milieu acide pour la première, milieu basique pour la deuxième) ainsi que la température de la synthèse (80°C pour la première, ébullition douce pour la deuxième).

c. Pour la synthèse n° 1 :

$n_{\text{alcool}} = \rho_{\text{eau}} \cdot d \cdot V/M = 2,0 \times 10^{-2}$ mol ;

$n_{\text{oxydant}} = c \cdot V = 7,5 \times 10^{-3}$ mol

Pour la synthèse n° 2 :

$n_{\text{alcool}} = \rho_{\text{eau}} \cdot d \cdot V/M = 2,0 \times 10^{-2}$ mol ;

$n_{\text{oxydant}} = c \cdot V = 3,0 \times 10^{-2}$ mol.

d. Pour la synthèse n° 1 :

$n_{\text{alcool}}/5 > n_{\text{oxydant}}/2$: les ions permanganate sont limitant.

Pour la synthèse n° 2 :

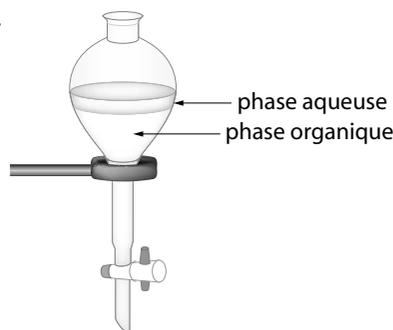
$n_{\text{alcool}}/3 < n_{\text{oxydant}}/4$: l'alcool benzylique est le réactif limitant.

2. a. La molécule 1 porte le groupe caractéristique aldéhyde, la molécule 2 le groupe caractéristique carboxyle.

b. La molécule A qui présente les bandes caractéristiques des aldéhydes ($\text{C}=\text{O}$ vers $1720 - 1740 \text{ cm}^{-1}$ et $\text{C}-\text{H}$ vers 2800 cm^{-1}) est le benzaldéhyde.

La molécule B est l'acide benzoïque.

3. a.



La phase aqueuse qui contient les ions et l'eau est au-dessus ($d = 1$).

La phase organique qui contient le solvant extracteur ($d = 1,32$) et le benzaldéhyde est au-dessous.

b. Il s'agit d'une extraction liquide-liquide.

4. a. On élimine l'espèce solide, l'oxyde de manganèse MnO_2 .

b. Le filtrat contient la base conjuguée de l'acide benzoïque : les ions benzoate.

c. En milieu fortement acide, les ions benzoate vont se transformer en acide benzoïque dont la solubilité est fortement diminuée par la baisse de la température : l'acide benzoïque précipite alors et se sépare de la phase aqueuse.

5. L'alcool est le réactif limitant : il est totalement consommé.

La quantité de matière d'ion benzoate et donc d'acide benzoïque est, d'après l'équation, égale à celle de l'alcool consommé :

$$n_{\text{acide}} = n_{\text{alcool}} = 2,0 \times 10^{-2} \text{ mol.}$$

Soit une masse $m = n \cdot M = 2,4$ g.

Le rendement est :

$$R = m_{\text{réelle}}/m_{\text{théorique}} = 0,79 = 79\%.$$

6. L'ensemble des conditions expérimentales dont le pH du milieu de la synthèse.

Chaîne de transmission d'informations

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
Chaîne de transmission d'informations	<ul style="list-style-type: none"> – Identifier les éléments d'une chaîne de transmission d'informations. – Recueillir et exploiter des informations concernant des éléments de chaînes de transmission d'informations et leur évolution récente.
Procédés physiques de transmission <ul style="list-style-type: none"> – Propagation libre et propagation guidée. – Transmission : <ul style="list-style-type: none"> • par câble ; • par fibre optique : notion de mode ; • transmission hertzienne. – Atténuations. 	<ul style="list-style-type: none"> – Exploiter des informations pour comparer les différents types de transmission. – Évaluer l'affaiblissement d'un signal à l'aide du coefficient d'atténuation. – <i>Mettre en œuvre un dispositif de transmission de données (câble, fibre optique).</i>

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Identifier les éléments d'une chaîne de transmission d'informations.
2. Comparer différents types de transmission.
3. Évaluer l'affaiblissement d'un signal.

Évaluation diagnostique p. 504

SITUATION 1

Les signaux de fumée et la téléphonie portable sont deux méthodes de transmission d'informations. Dans les deux cas, une personne souhaite adresser un message à une autre à une certaine distance. Le signal transportant l'information est émis dans l'espace libre autour de l'émetteur. De plus, la nature physique du signal est dans les deux cas une onde électromagnétique.

L'activité 1 présente différentes situations de transmission d'informations pour lesquelles les différents éléments composants les chaînes de transmission seront identifiés.

SITUATION 2

L'expérience proposée consiste à éclairer, à l'aide d'un faisceau lumineux, un dioptre entre un milieu 1 et un milieu 2, d'indice optique moins élevé.

À partir d'une valeur particulière de l'angle d'incidence, le faisceau transmis dans le milieu 2 n'existe pas et seul demeure le faisceau réfléchi dans le milieu 1. Ce phénomène est appelé réflexion totale.

L'activité 2 propose de mettre en œuvre une fibre optique fonctionnant grâce au phénomène de réflexion totale.

SITUATION 3

Les barres figurant sur l'écran de l'ordinateur indiquent la puissance relative du signal wifi reçu par l'ordinateur. Lorsque l'on s'éloigne de l'émetteur, la puissance du signal diminue. On dit que le signal est affaibli.

L'activité 3 propose de mesurer quantitativement l'affaiblissement d'un signal wifi.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

Comment transmettre des informations ? p. 506

1. Figure 1 : la source et le destinataire sont les deux personnes qui discutent.

Figure 2 : la source est le téléspectateur et le destinataire est le poste de télévision.

Figure 3 : la source et le destinataire sont les deux personnes qui discutent par téléphone.

Figure 4 : la source est l'arbitre et les destinataires sont les joueurs.

Figure 5 : la source est le véhicule et le destinataire est la barrière de péage.

Figure 6 : la source est de la fumée et le destinataire est la sirène d'alarme.

2. a. Signal lumineux : figure 1.
- b. Signal sonore : figure 4.
- c. Signal électrique : figures 3 et 6.
- d. Signal radio : figure 5.

3. Les figures 3 et 6 correspondent à des situations où le support de transmission de l'information n'est pas de l'air.

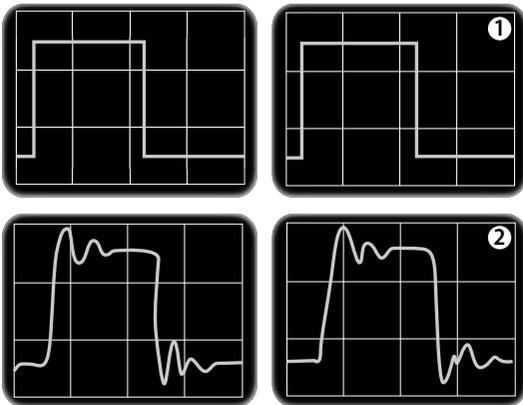
4. a. Tout exemple de transmission d'informations.
- b. Les réponses dépendent des exemples choisis.

ACTIVITÉ 2

La lumière guidée

p. 507

1. La propagation de la lumière se produit grâce à la réflexion totale de la lumière à l'intérieur de la fibre.
2. Hypothèses à formuler par les élèves.
3. a. Sur l'oscillogramme ci-dessous, on mesure des valeurs de périodes identiques.
- b. La propagation dans la fibre optique ne modifie pas la valeur de la période du signal.
4. a. Le signal 1 est celui délivré par le GBF, à l'entrée du module émetteur. Le signal 2 est celui reçu à la sortie du dispositif après transmission dans la fibre optique.



- b. Les deux signaux obtenus ont la même allure (une légère déformation est possible) mais n'ont pas la même amplitude et sont décalés. Ils ne sont donc pas superposables.
- c. Le décalage dans le temps entre le signal de départ et le signal à l'arrivée correspond au temps mis par le signal pour parcourir la fibre optique.

d. Valeurs données à titre indicatif qui dépendent du matériel utilisé et des caractéristiques du signal choisi. En utilisant le calibre $200 \text{ ns} \cdot \text{div}^{-1}$, le retard τ_1 mesuré avec la fibre n° 1 ($L_1 = 5,0 \text{ m}$) est compris entre 4,4 et 4,6 divisions. Pour la fibre n° 2 ($L_2 = 25,0 \text{ m}$), le retard τ_2 est mesuré entre 5,0 et 5,2 divisions.

5. a. L'incertitude sur cette mesure peut être estimée en première approximation à la moitié de la plus petite graduation (0,2 division avec un oscilloscope standard).
- b. Les résultats des mesures précédentes s'écrivent donc :

$$\tau_1 = 4,5 \pm 0,1 \text{ div} = 0,90 \pm 0,02 \mu\text{s} ;$$

$$\tau_2 = 5,1 \pm 0,1 \text{ div} = 1,02 \pm 0,02 \mu\text{s}.$$

- c. La précision relative de ces mesures est de 2 %, en effet :

$$\left| \frac{\delta\tau}{\tau_1} \right| \times 100 = \frac{0,1}{4,5} \times 100 = 2 \% ;$$

$$\left| \frac{\delta\tau}{\tau_2} \right| \times 100 = \frac{0,1}{5,1} \times 100 = 2 \%.$$

6. a. La vitesse de propagation du signal dans la fibre est égale au rapport de la distance parcourue par la durée du parcours.

Les retards mesurés sont essentiellement dus à la propagation du signal dans la fibre mais également à différents phénomènes électroniques. Afin de ne conserver que le retard dû à la propagation, on procède de façon différentielle pour calculer une longueur parcourue et la durée correspondante. Avec les résultats indicatifs précédents :

$$L = L_2 - L_1 = 25,0 - 5,0 = 20,0 \text{ m} ;$$

$$\tau = \tau_2 - \tau_1 = 1,02 - 0,90 = 0,12 \pm 0,02 \mu\text{s}.$$

On en déduit une estimation de la vitesse de propagation dans la fibre :

$$v = L/\tau = 20,0/0,12 = 1,7 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Remarque : la principale source d'incertitude provenant de la mesure des retards à l'oscilloscope, nous pouvons négliger les autres. L'incertitude sur v s'obtient donc à partir de la précision calculer à la question 5.c.

$$\left| \frac{\delta v}{v} \right| \approx \left| \frac{\delta\tau}{\tau} \right| = 0,02,$$

$$\text{soit } \delta v = 0,02 \times 1,7 \times 10^8 = 0,03 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Cette valeur étant plus petite que le dernier chiffre significatif du résultat obtenu, il n'est pas pertinent de l'indiquer.

- b. La vitesse de propagation du signal dans la fibre est inférieure à la propagation des ondes lumineuses dans l'air.

7. a. La réponse dépend des réponses des élèves à la question 2.

b. La qualité de la propagation d'un signal ne dépend pas uniquement de sa vitesse de propagation. Les exemples sont variés : les ondes radios peuvent être stoppées par des obstacles, les ondes guidées permettent un plus grand débit d'informations, les ondes radios pourraient causer des nuisances...

ACTIVITÉ 3

« Y a-t-il du réseau ? »

p. 508

1. a. $\Pi = 10 \cdot \log(10^3 \cdot P) \Rightarrow 10^3 \cdot P = 10^{\frac{\Pi}{10}} \Rightarrow P = 10^{\frac{\Pi}{10}-3}$

d'où $P = 10^{-3}$ mW pour un signal de -30 dBm.

b. D'après l'expression donnée, lorsque la valeur de Π diminue, la valeur de la puissance P également.

2. a. Il suffit d'éloigner d'un émetteur wifi, un ordinateur portable disposant d'un logiciel de mesure de la puissance du signal wifi.

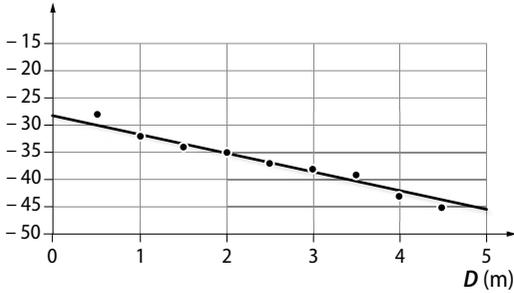
b. La puissance du signal reçu diminue lorsque l'on s'éloigne de la source.

3. a. D'après l'expression du coefficient d'atténuation, il est nécessaire de mesurer la puissance entre deux points A et B ainsi que la distance qui les séparent.

b. Afin de minimiser les erreurs, il est intéressant de réaliser plusieurs mesures de puissances pour différentes distances et de consigner les valeurs dans un tableau. On obtient les valeurs suivantes (données à titre indicatif) :

D (m)	0,50	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
Π (dBm)	-28	-32	-34	-35	-37	-38	-39	-43	-45

c. Π (dBm)



4. a. $\Pi = \Pi_0 - \frac{10 \cdot \alpha}{\ln(10)} \cdot D$, soit :

$$\alpha = \frac{-\ln(10)}{10} \cdot \frac{\Pi - \Pi_0}{D} = \frac{-\ln(10)}{D} \cdot \frac{\Pi - \Pi_0}{10}$$

$$= \frac{-\ln(10)}{D} \cdot \log\left(10^{\frac{\Pi - \Pi_0}{10}}\right) = \frac{-\ln(10)}{D} \cdot \log\left(\frac{P}{P_0}\right)$$

Le logarithme du rapport des puissances s'exprime en decibel (dB) et D en mètre (m). Le coefficient α s'exprime donc en $\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$.

b. La courbe de la question 3.c représente les variations de Π en fonction de D . D'après la relation indi-

quée, la courbe peut être modélisée par une fonction affine de coefficient directeur $\frac{-10 \cdot \alpha}{\ln(10)}$ et d'ordonnée à l'origine Π_0 .

c. Le tableur-grapheur ne prend pas en compte les chiffres significatifs, il faut ici que les valeurs retenues aient autant de chiffres significatifs que les données qui en ont le moins.

5. a. La valeur de la puissance du signal émis par le routeur est la valeur de Π_0 . Elle correspond à l'ordonnée à l'origine de la droite obtenue. Avec les résultats indicatifs, on obtient $\Pi_0 = -27$ dBm.

b. La valeur du coefficient d'atténuation linéique α s'obtient à partir de la valeur du coefficient directeur a de la droite obtenue : $a = \frac{-10 \cdot \alpha}{\ln(10)} \Rightarrow \alpha = \frac{-\ln(10) \cdot a}{10}$

Avec les valeurs indicatives données, on obtient :

$$\alpha = 0,87 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$$

c. L'équation de la droite obtenue permet de calculer la valeur de Π pour $D = 12$ m.

Avec les valeurs indicatives, on obtient $\Pi = -73$ dBm.

6. La puissance calculée précédemment est supérieure à la valeur limite indiquée, la connexion wifi est donc opérationnelle à une distance de 12 m.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : Identifier les éléments d'une chaîne de transmission d'informations

1 1. a.

2. b.

2 1. *Vrai.*

2. *Faux.* L'émetteur et le récepteur peuvent modifier la nature physique du message pour le transformer en un signal plus facile à transmettre.

3. *Vrai.*

4. *Faux.* Un signal peut également être sonore, électrique...

3 1. La situation décrite constitue une chaîne de transmission d'informations car elle correspond à un dispositif qui permet le déplacement d'un message entre une source et un destinataire.

2. a. La source est le train et le destinataire est le bandit.

b. Les roues du train jouent le rôle d'émetteurs et l'oreille et les mains du bandit jouent le rôle de récepteurs.

c. Le rail est le support du transport de l'information. Il relie l'émetteur et le récepteur.

3. a. Le signal à transmettre est une onde mécanique, provoquée par les roues du train, qui se propage dans les rails.

b. Il n'est pas nécessaire d'utiliser son oreille car les vibrations mécaniques peuvent être perçues par les doigts. C'est le sens du touché qui est ici sollicité.

4 1. a. Le conducteur constitue la source du message et le portail, le destinataire.

b. Dans cette chaîne de transmission, l'émetteur est le dispositif électronique contenu dans la télécommande.

2. Le support de l'information est l'espace libre entre l'utilisateur et le portail.

3. Le signal transmis est une onde électromagnétique du domaine infrarouge.

5 1. a. a La source est l'automate contenu dans le feu tricolore et le destinataire est le conducteur. b La source et le destinataire sont les deux personnes en train de se parler.

b. a L'émetteur est la lampe du feu tricolore. b L'émetteur est le téléphone portable.

2. a. a le signal est une onde lumineuse. b Le signal est une onde radio.

b. Les ondes lumineuses et les ondes radio sont toutes deux des ondes électromagnétiques.

3. Dans les deux cas, le support de l'information est l'air.

COMPÉTENCE 2 : Comparer différents types de transmission

6 1. Faux. Ils peuvent être également transportés par fibre optique ou dans un espace libre.

2. Faux. L'émission et la réception d'un signal entre deux antennes est un exemple de transmission non guidée.

3. Vrai.

8 1. USB (*Universal Serial Bus*) : dispositif de connexion filaire entre périphériques informatiques.

Wifi (*Wireless Fidelity*) : dispositif de connexion sans fil par ondes radios.

2. Pour avoir une propagation guidée, il faut que le signal se déplace dans un espace fini, ce qui est le cas dans un câble USB.

3. USB : débit important indépendant de la distance ordinateur-périphérique.

Wifi : possibilité de créer un réseau sans installation fixe.

9 1. Les fibres optiques sont utilisées dans le domaine médical et dans les télécommunications.

2. Le signal transmis dans une fibre optique est un signal électromagnétique.

3. Les fibres optiques permettent de disposer d'un débit plus élevé que les fils électriques.

10 1. a. On dénombre quatre modes différents.

b. Le mode fondamental correspond à un trajet en ligne droite (chemin orange).

2. a. La vitesse de propagation de la lumière est constante dans la fibre quel que soit le chemin suivi. Comme les impulsions lumineuses suivent des trajets de longueurs différentes, elles n'arrivent pas en même temps à l'extrémité de la fibre.

b. L'inconvénient majeur de la dispersion modale se situe au niveau de la réception : une impulsion émise sur un temps très court va être reçue pendant une durée nettement plus longue (différence de temps mis entre le mode fondamental et le trajet le plus long).

3. La dispersion modale peut être réduite par une diminution progressive de l'indice de réfraction du cœur de la fibre le long de son rayon. Ainsi, la vitesse de propagation croît lorsque le rayon lumineux s'éloigne de l'axe ce qui compense l'augmentation du trajet. Les fibres conçues à partir de ce principe sont appelées « fibre à gradient d'indice ».

COMPÉTENCE 3 : Évaluer l'affaiblissement d'un signal

11 1. a.

2. c.

12 1. a. L'atténuation d'un signal correspond à la diminution progressive de l'énergie qu'il transporte au cours de sa propagation.

b. Les valeurs indiquées correspondent au coefficient d'atténuation linéique du câble utilisé.

2. Pour deux fréquences différentes, la valeur du coefficient d'atténuation n'est pas constante. L'atténuation varie donc en fonction de la fréquence.

13 1. Par lecture graphique, on détermine que l'atténuation A vaut $-4,9$ dB à la distance $1,5$ km.

2. On calcule le coefficient directeur de la droite :

$$\alpha = \frac{A}{-4,3 \cdot x} = \frac{-4,9}{-4,3 \times 1,5} = 0,76 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$$

14 1. a. Le débit reste constant sur $0,5$ km.

b. Il diminue.

2. Le signal est atténué car sa capacité à transmettre des informations diminue.

3. Plus l'atténuation est limitée, plus la quantité d'informations pouvant circuler est importante.

16 1. D'après l'énoncé, la valeur de la puissance est divisée par 3,3 : $P = \frac{P_0}{3,3} = \frac{6,0}{3,3} = 1,8 \text{ mW}$.

2. a. On a :

$$\alpha = \frac{-\ln(10)}{AB} \cdot \log\left(\frac{P_B}{P_A}\right) = \frac{-\ln(10)}{250} \cdot \log\left(\frac{1,8}{6,0}\right)$$
$$= 2,4 \times 10^{-3} \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1} = 2,4 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}.$$

b. La valeur mesurée est inférieure à la limite indiquée dans l'énoncé, l'installation est donc conforme.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

17 1. Dans cette chaîne de transmission, la source est l'arbitre et le destinataire le joueur sanctionné.

2. a. Dans cette situation, il y a un signal sonore (le coup de sifflet) et un signal visuel (le carton rouge).

b. C'est deux signaux n'ont pas la même nature physique, l'un est une onde mécanique et l'autre une onde électromagnétique.

3. Le support de l'information se fait dans l'espace libre entre l'arbitre et le joueur.

18 1. Ce dispositif permet de transmettre de l'information car il assure le transfert d'un message entre une source et un destinataire sur des distances relativement importantes.

2. a. Dans ce dispositif, l'émetteur et le récepteur sont l'opérateur des bras articulés et un observateur.

b. Le signal transmis est de nature optique, les positions des bras articulés sont directement observées.

3. Ce signal peut être considéré comme atténué car à partir d'une certaine distance, l'observateur ne peut plus distinguer le dispositif. Il en va de même si l'observateur se trouve au-delà de la ligne d'horizon dégagée.

4. Les inconvénients sont nombreux car la transmission de l'information : dépend des conditions météorologiques, impose un code convenu à l'avance, peut être lue par toutes personnes ayant connaissance du code...

19 1. Le boîtier disposé dans la voiture est un récepteur. Il reçoit les signaux émis par les satellites.

2. Le signal est de nature électromagnétique.

3. a. Les barres de niveau illustre la puissance du signal capté par le récepteur.

b. Lorsque la puissance du signal reçue diminue, le nombre de barre se réduit. Il s'agit d'un témoin d'atténuation du signal GPS.

c. Lors d'un déplacement, lorsque le signal émis par un satellite est atténué, il peut être suppléé par celui émis par un autre satellite. Plus les satellites sont nombreux et moins le signal apparaît affaibli pour l'utilisateur.

20 Technologies sans fil

Il existe deux catégories de technologies sans fil assurant la connexion des périphériques informatiques (clavier, souris...) : l'infrarouge (IR) et les ondes radio (RF). La technologie Bluetooth utilise les fréquences radio pour assurer les communications sans fils. Contrairement à l'infrarouge, les ondes radio ne nécessitent pas un espace sans obstacle entre les périphériques et le récepteur.

1. a. Quels sont les différences et les points communs entre les infrarouges et les ondes radio ?

Les ondes infrarouges et radios sont des ondes électromagnétiques qui diffèrent par les gammes de fréquences (ou de longueurs d'onde) qui les caractérisent.
b. Ont-ils la même nature physique ?

Ces deux ondes reposent sur le même phénomène physique.

2. Les infrarouges et les ondes radios se comportent-ils de la même façon face à un obstacle ?

Ces deux types d'onde ne se comportent pas de façon identique lorsqu'elles rencontrent un obstacle : les ondes infrarouges sont absorbées alors que les ondes radios traversent l'obstacle.

21 1. Les exemples sont très nombreux : transmission par signaux, par messenger, par écrit...

2. a. Pour le téléphone, le message est une onde sonore.

b. Pour un téléphone filaire, le signal entre l'émetteur et le récepteur est de nature électrique.

c. Un téléphone peut être considéré comme un convertisseur car il transforme une onde mécanique sonore qui se propage librement en un signal électrique qui se propage dans un câble électrique.

3. a. Les signaux électriques subissent une atténuation au cours de leur propagation. Le choix d'une distance courte permet de s'affranchir de cette difficulté.

b. Sur de longues distances, il est nécessaire de réamplifier et remettre en forme le signal initial.

22 Coefficient d'atténuation

L'atténuation est le nom donné à la diminution de l'amplitude d'un signal. Il existe plusieurs facteurs pouvant créer cette atténuation : résistance des fils de cuivre, perte de fuites d'énergétiques du signal... Pour résoudre le problème, il est donc nécessaire de nettoyer le signal en ajoutant au réseau des répéteurs, des commutateurs ou des émetteurs par exemple. Le signal peut ainsi être régénéré.

1. Quelles sont les principales causes d'atténuation d'un signal ?

L'atténuation d'un signal peut être causée par le caractère résistif des fils de cuivre ou par des fuites présentes sur le canal de transmission.

2. Quelles sont les conséquences de ce phénomène ?

L'atténuation peut causer une déformation progressive du signal dont l'amplitude ne sera plus suffisante pour être convenablement transmise.

3. Quels types de solutions peuvent être envisagés ?

Pour lutter contre l'atténuation d'un signal, il est nécessaire de disposer régulièrement des dispositifs d'entretien du signal.

23 1. a. **a** gaine ; **b** conducteur ; **c** diélectrique ; **d** conducteur.

b. Un câble coaxial comprend deux parties conductrices séparées par un matériau isolant alors qu'un fil classique est constitué d'un fil conducteur gainé de plastique.

2. La grandeur notée impédance s'exprime en ohm (symbole W), elle peut donc être considérée comme un conducteur ohmique dont la résistance s'exprime dans la même unité.

3. a. La valeur exprimée en dB · m⁻¹ correspond au coefficient d'atténuation linéique.

b. Ce coefficient est associé à une fréquence car la valeur du coefficient d'atténuation dépend de la fréquence.

24 1. a. La longueur d'onde, exprimée ici en nm.

b. Le coefficient d'atténuation linéique, exprimé en dB · km⁻¹.

2. a. Pour 950 nm.

b. Elle correspond au domaine infrarouge.

3. a. À 900 nm, le coefficient d'atténuation vaut 2 dB · km⁻¹.

b. À cette longueur d'onde on atteindra une atténuation de - 3 dB pour 1,5 km.

c. Une atténuation de - 1 dB sur une distance de 1,5 km correspond à un coefficient d'atténuation de 0,67 dB · km⁻¹. Sur le graphique, cela correspond approximativement aux intervalles de longueur d'onde suivants (en nm) : [800 ; 840] et [1 025 ; 1 060].

25 1. a. Un signal wifi est une onde électromagnétique du domaine radio.

b. Un signal wifi se propage dans toutes les directions de l'espace sans support, il s'agit donc d'une propagation libre.

2. La perte de signal est évaluée à 28 %, soit P/P₀ = 0,28.

3. Par définition :

$$\alpha = \frac{-\ln(10)}{AB} \cdot \log\left(\frac{P_B}{P_A}\right) = \frac{-\ln(10)}{8,0} \times \log(0,28) = 1,6 \times 10^{-1} \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}.$$

26 1. Par définition :

$$\alpha = \frac{-\ln(10)}{AB} \cdot \log\left(\frac{P_B}{P_A}\right).$$

2. a. On en déduit :

$$AB = \frac{-\ln(10)}{\alpha} \cdot \log\left(\frac{P_B}{P_A}\right).$$

b. A.N. :

$$AB = \frac{-\ln(10)}{120 \times 10^{-3}} \times \log\left(\frac{15}{300}\right) = 25 \text{ m}.$$

La distance au bout de laquelle la communication s'interrompt vaut 25 m. Il ne fallait donc pas s'éloigner de plus de 25 m de l'antenne.

27 1. a. Les supports d'information considérés dans cet exercice sont : un câble coaxial, une fibre optique et un espace libre.

b. Dans ces trois supports, le signal est de nature électromagnétique.

2. a. Le câble coaxial présente l'atténuation la plus forte.

b. La courbe associée à l'espace libre est une droite, cette grandeur varie donc linéairement.

3. a. Pour la fibre optique étudiée, l'atténuation est nulle jusqu'à une distance de 10 km.

b. L'espace libre présente une atténuation supérieure à la fibre optique jusqu'à une distance de 100 km. Au-delà l'atténuation de la fibre optique diminue fortement. La fibre optique est donc préférable pour les distances inférieures à 100 km.

4. Les valeurs de l'atténuation varient linéairement si le signal ne rencontre aucun obstacle. En milieu urbain, l'atténuation en propagation libre est nettement plus importante.

EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

28 1. a. $[A] = 10 \cdot \log\left(\frac{[P_0]}{[P]}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{[W]}{[W]}\right) = [\emptyset].$

Le décibel, sous-multiple du bel, est donc une grandeur sans unité. C'est un outil mathématique de comparaison logarithmique.

b. L'atténuation d'un tiers de la puissance se traduit par le rapport :

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{3} = 0,33, \text{ d'où :}$$

$$A = 10 \cdot \log\left(\frac{P_0}{P}\right) = 10 \cdot \log(3) = 4,8 \text{ dB}.$$

2. a. $[A] = \frac{1}{2} \cdot \ln\left(\frac{[P_0]}{[P]}\right) = \frac{1}{2} \cdot \ln\left(\frac{[W]}{[W]}\right) = [\emptyset].$

Le néper n'est donc pas une grandeur sans unité.

b. $A' = \frac{1}{2} \cdot \ln\left(\frac{P_0}{P}\right) = \frac{1}{2} \times \ln(3) = 0,55 \text{ Np}.$

3. La valeur de 1 Np vaut donc $1 \text{ Np} = \frac{4,8}{0,55} = 8,7 \text{ dB}$.

On retrouve la valeur proposée dans l'énoncé.

$$\mathbf{29 \ 1.} \quad \alpha = \frac{-\ln(10)}{AB} \cdot \log\left(\frac{P_B}{P_A}\right) \Rightarrow \alpha = \frac{-\ln(10)}{AB} \cdot \frac{\ln\left(\frac{P_B}{P_A}\right)}{\ln(10)}$$

$$\Rightarrow \alpha = \frac{-1}{AB} \cdot \ln\left(\frac{P_B}{P_A}\right) \Rightarrow \ln\left(\frac{P_B}{P_A}\right) = -\alpha \cdot AB$$

$$\Rightarrow \frac{P_B}{P_A} = e^{-\alpha \cdot AB} \Rightarrow P_B = P_A \cdot e^{-\alpha \cdot AB}$$

$\mathbf{2.} \quad \frac{P_B}{P_A} = e^{-\alpha \cdot AB} = e^{-8,0 \times 10^{-2} \times 2,5} = 0,82$. Soit une atténuation de 82 %.

Numérisation d'un signal

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
Signal analogique et signal numérique – Conversion d'un signal analogique en signal numérique. – Échantillonnage ; quantification ; numérisation.	– Reconnaître des signaux de nature analogique et des signaux de nature numérique. – Mettre en œuvre un protocole expérimental utilisant un échantillonneur-bloqueur et/ou un convertisseur, analogique numérique (CAN) pour étudier l'influence des différents paramètres sur la numérisation d'un signal (d'origine sonore par exemple).
Procédés physiques de transmission – Débit binaire.	– Caractériser une transmission numérique par son débit binaire.

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Reconnaître des signaux analogiques et numériques.
2. Comprendre le principe de numérisation d'un signal.
3. Caractériser une transmission numérique par son débit binaire.

Évaluation diagnostique p. 520

SITUATION 1

Les médias numériques jouissent actuellement d'une réputation de haute qualité : son numérique, télévision numérique, etc. Leur réel avantage est leur faible sensibilité aux perturbations qui en font un mode idéal de transmission de l'information.

Pourtant, si on regarde en détails comment il est produit à partir de sa version originale analogique, on se rend compte qu'un média numérique, bien qu'il s'en approche, est toujours « moins riche » que l'original : une partie du signal est systématiquement perdu (avant même de chercher à « compresser » le média). Ainsi, dans l'absolu, un média numérique est toujours moins complet que sa version analogique mais il est quand même souvent difficile de faire la différence.

Les **activités 1** et **2** montrent les limites de la numérisation et permettent de mieux comprendre le problème soulevé par cette question. L'**activité 3** présente le principal problème qui oblige la limitation de la taille des médias numérique : le débit numérique.

SITUATION 2

Pour ranger une balle dans deux tiroirs, on peut mettre la balle soit dans le tiroir du haut, soit dans celui du bas : ce qui fait deux possibilités.

Pour ranger deux balles dans un tiroir, on peut soit les mettre dans le tiroir du haut, soit ne mettre que la première dans le tiroir du haut et l'autre dans le tiroir du bas, soit faire l'inverse, soit mettre les deux dans le tiroir du bas : il y a donc quatre possibilités.

Pour en ranger N , en généralisant ce même raisonnement, on trouvera 2^N façons différentes.

Pour chaque balle, il y a deux possibilités, de la même façon que pour chaque « bit numérique », il y a deux valeurs possibles : 0 ou 1. Le dénombrement des valeurs numériques différentes que l'on peut écrire suivant le nombre de bits utilisé sera employé dans les **activités 1** et **2**.

SITUATION 3

Le problème du pavage se ramène au problème de l'échantillonnage et du nombre de bits utilisés pour la numérisation : comment choisir ces deux paramètres pour que la version numérique du signal se rapproche au mieux de l'original analogique ?

Pour le pavage, la réponse est simple : plus le pavé est petit, mieux il recouvrira la surface et plus il suivra précisément les contours.

Cette idée simple sera appliquée plus particulièrement à la numérisation lorsqu'on étudiera la fréquence d'échantillonnage et le pas de numérisation, dans les **activités 2** et **3**.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

La qualité du son numérique

p. 522

1. On dit d'un CD qu'il comporte un codage binaire car les données y sont inscrites sous la forme de « 0 » et de « 1 » uniquement.

2. a. D'après le texte, on peut écrire que le signal numérique contenant les « données musicales » est 0101110010.

b. Ce signal est constitué de 10 bits.

3. Le signal recomposé à partir du numérique est légèrement différent du signal analogique de départ : il présente des « échelottes » qui sont dues au fait que tous les points de la courbe analogique ne sont pas retenus et qu'il n'y a pas une valeur numérique pour chaque valeur de tension électrique.

4. On pose f le nombre de points par seconde, k le nombre de bits d'encodage et D le débit binaire. En appliquant le même raisonnement que lors du calcul du débit d'un CD audio, on trouve la relation $D = N \cdot k \cdot f$ pour N canaux. Ici, $D_{\text{total}} = 6 \cdot k \cdot f$ d'où $f = D / (6k) = 2,82 \times 10^7 / (6 \times 24) = 1,96 \times 10^5$ points par seconde.

5. Le signal recomposé à partir de sa version numérique n'est pas l'exacte copie du signal analogique de départ. De ce fait, la musique d'origine (analogique) n'est pas exactement restituée lors de la lecture du CD.

6. a. On sait que 2 min = 120 s. Ainsi, la quantité de bits n écrit sur le support pour 2 minutes de musique est :
 – pour un CD : $n = 120 \times 1,411 \times 10^6 = 1,683 \times 10^8$ bits ;
 – pour un DVD : $n = 120 \times 2,82 \times 10^7 = 3,38 \times 10^9$ bits.

b. Pour une même durée d'enregistrement, un DVD-Audio contient plus d'information qu'un CD (environ 20 fois plus), ce qui le rend beaucoup plus précis et donc beaucoup plus fidèle au signal analogique de départ.

ACTIVITÉ 2

La numérisation d'un son

p. 523

1. On construit ainsi le tableau :

U_{AM} (V)	Position des interrupteurs			
	K_1	K_2	K_3	K_4
0	0	0	0	0
0,313	0	0	0	1
0,625	0	0	1	0
0,938	0	0	1	1
1,25	0	1	0	0
1,56	0	1	0	1
1,88	0	1	1	0
2,19	0	1	1	1
2,50	1	0	0	0
2,81	1	0	0	1

U_{AM} (V)	Position des interrupteurs			
	K_1	K_2	K_3	K_4
3,12	1	0	1	0
3,44	1	0	1	1
3,75	1	1	0	0
4,06	1	1	0	1
4,38	1	1	1	0
4,69	1	1	1	1

2. On remarque que les valeurs de U_{AM} augmentent toujours de la même quantité : environ 0,313 V.

3. Avec 4 interrupteurs, on obtient $2^4 = 16$ valeurs différentes. Avec 8 interrupteurs, on obtiendrait donc $2^8 = 256$ valeurs différentes.

4. Il faut commencer par l'interrupteur K_1 . Si, lorsqu'on met K_1 à 1, la DEL D_2 se met à briller, alors on le replace en position 0 (on sait ainsi si la tension est supérieure ou inférieure à 2,5 V). On fait de même successivement avec K_2 , puis K_3 et enfin K_4 .

5. On dit que la tension U_{AM} est quantifiée car on peut lui associer une valeur numérique binaire : il suffit de noter les positions des 4 interrupteurs.

6. Entre deux valeurs numériques binaires, il y a une différence de 0,313 V. Ainsi, par exemple, toutes les valeurs de tension comprises entre 2,2 et 2,5 V sont codées par la valeur numérique 0111. Avec 8 bits plutôt que 4, l'intervalle de tension entre deux valeurs numériques successives serait de $5,00/2^8 = 0,0195$ V, soit 16 fois plus petit.

7. L'échantillonnage permet de maîtriser la durée entre deux valeurs numériques : en effet, la quantification n'est pas immédiate (et certainement de durée irrégulière). Ainsi, puisqu'un signal électrique est représenté par un ensemble de points dans un espace à deux dimensions (temps, tension), la quantification s'intéresse à la coordonnée « tension » et l'échantillonnage à la coordonnée « temps ».

8. Il faut laisser le temps à l'étage électronique qui quantifie la tension de finir sa procédure avant de vouloir encoder une nouvelle valeur.

Ainsi, on doit choisir $T_e > \Delta t$.

9. La numérisation d'un signal se déroule en deux étapes :

– **échantillonnage** qui permet de prélever une valeur de tension à intervalle de temps régulier ;

– **quantification** qui permet d'associer à chacune des tensions prélevées une valeur numérique binaire.

ACTIVITÉ 3

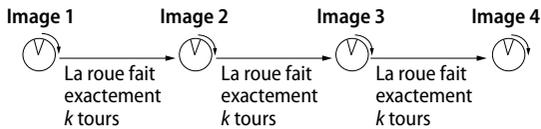
Problèmes d'échantillonnage

p. 524

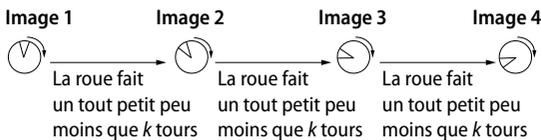
1. Une animation cinématographique est constituée d'une série d'images successives peu différentes qui défilent très rapidement devant les yeux (à raison de

24 images par seconde pour le cinéma). La persistance rétinienne nous donne alors l'illusion de la fluidité de l'animation.

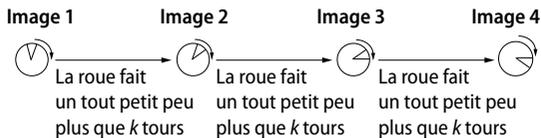
2. a. Lorsque la fréquence de la roue est égale à (ou multiple de) la fréquence des images, la roue semble figée (k est un entier).



b. Si on diminue alors un peu sa fréquence de rotation, la roue semble tourner à l'envers.



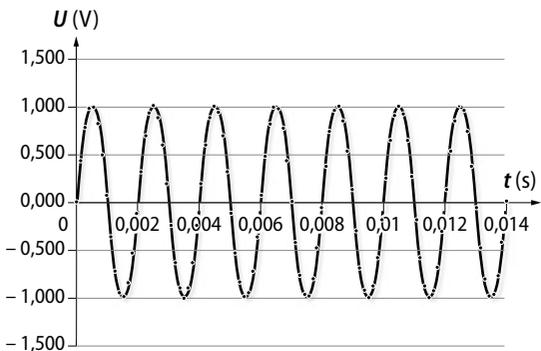
c. Si par contre on augmente un peu sa fréquence de rotation, la roue semble tourner au ralenti.



3. a. Une fréquence de 500 Hz correspond à une période $T = 1/(500) = 2,00 \times 10^{-3}$ s. La durée totale t (7 période) sera donc $t = 1,40 \times 10^{-2}$ s. Puisqu'il faut 100 points, l'intervalle de temps Δt entre deux points sera $\Delta t = 1,40 \times 10^{-2}/100 = 1,40 \times 10^{-4}$ s = 140 μ s.

b. La fréquence d'échantillonnage sera : $f_e = 1/(1,40 \times 10^{-4}) = 7,14 \times 10^3$ Hz.

4. On obtient le graphique suivant, sur lequel on lit (avec plusieurs périodes) : $T = 2,0 \times 10^{-3}$ s. Ce qui correspond à la réalité.



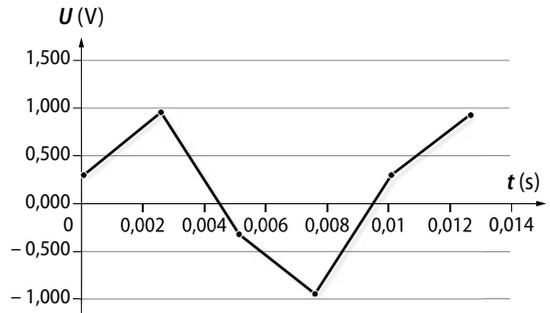
5. a. Si la fréquence d'échantillonnage vaut 400 Hz, alors il y a 400 points par seconde. On a donc $\Delta t = 1/400 = 2,50 \times 10^{-3}$ s = 2,50 ms.

b. Pour une durée totale d'acquisition de :

$$t = 1,40 \times 10^{-2} \text{ s (voir 3.a),}$$

il y aura donc $n = 1,40 \times 10^{-2}/2,50 \times 10^{-3} = 5,6 = 5$ intervalles, soit 6 points en tout.

6. On obtient la représentation suivante :



La période du signal représenté est de 10,0 ms, ce qui est 5 fois plus grand que la période réelle du signal de départ. Si la fréquence d'échantillonnage est trop faible, le signal de départ ne pourra pas être récupéré.

7. a. Par tâtonnement, on se rend compte que l'on peut retrouver la valeur correcte de la période à partir du moment où l'on a au moins 2 points par période.

b. La fréquence d'échantillonnage qui permet de retrouver une période correcte doit donc être supérieure à 1 000 Hz.

8. Une fréquence d'échantillonnage trop faible par rapport à celle du signal numérisé fait perdre l'information sur la fréquence du signal (il semble plus « lent »). De la même façon, si la fréquence des images qui se succèdent est trop faible par rapport à la fréquence du phénomène filmé, alors ce dernier semblera se produire à une fréquence plus faible que dans la réalité.

9. Le critère de Shannon nous impose de prendre une fréquence d'échantillonnage au moins 2 fois supérieure à la fréquence du signal à numériser, comme on le voit à la question 7.b.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : Reconnaître des signaux analogiques et numériques

1. 1. Faux. Un signal recomposé à partir de sa version numérique ne correspond pas exactement au signal numérique de départ : certaines données ont été perdues et le signal présente des « échelettes ».

2. Vrai.

3. Faux. C'est l'inverse.

2 Bastien a tort. Les signaux vidéo analogiques et numériques n'ont absolument pas la même forme. Un appareil prévu pour interpréter uniquement un signal

analogique ne pourra pas fonctionner si on lui transmet un signal numérique, et vice-versa.

3 Le signal **a** est numérique : il n'y a que deux valeurs possibles pour la tension. Le signal **b** n'est pas numérique : il y a alternance entre des signaux divers et un signal créneau. Le signal **c** est l'exemple typique d'un signal analogique. Le signal **d** n'est pas un signal numérique car il y a plus de deux valeurs différentes accessibles.

4 a. Un piano à queue produit des sons grâce des cordes frappées par des marteaux couverts de feutre. Il ne s'agit pas d'un signal numérique.

b. Une guitare électrique produit des sons lorsqu'on met en vibration ses cordes. Ces sons sont transformés en signaux électriques analogiques qui sont ensuite amplifiés. Il n'y a aucun signal numérique.

c. Un synthétiseur, comme son nom l'indique, produit des sons synthétiques. Il dispose d'une banque de sons numériques qu'il peut éventuellement transformer. Il peut ainsi produire des sons qui ressemblent au sons d'autres instruments ou pas, à partir d'échantillons numériques.

d. Le piano Fender est au piano classique ce que la guitare électrique est à la guitare classique : les sons sont transformés en signaux analogiques qui sont ensuite simplement amplifiés. Il n'y a donc pas de signaux numériques.

5 À partir du moment que le son est enregistré sur un ordinateur, il a forcément été numérisé. En effet, un ordinateur ne sait traiter que des données binaires (0 et 1). Ce son est donc numérique mais sa mauvaise qualité est plus liée au microphone et au haut-parleur utilisé qu'à la numérisation elle-même. Numériser un signal de mauvaise qualité ne va pas le rendre plus « pur ».

6 1. a. A est la surface d'un CD et B celle d'un disque microsillon.

b. Un CD contient des informations codées sous forme de 0 et 1 : il n'y a donc que deux niveaux, ce qui se traduit à sa surface par une succession de trous et de zones plates. La forme d'un microsillon est continue, comme un signal analogique.

2. Les deux disques sont en rotation, dans les deux cas la piste en forme de spirale est parcourue par une « tête de lecture » : un faisceau laser très fin dans les cas d'un CD et un diamant dans le cas du disque microsillon. Dans le cas du CD, les bits sont répartis régulièrement le long de la piste. Le fait que la lumière laser rentre ou sorte d'un trou se traduit par un « 1 », un plat se traduit par un « 0 ».

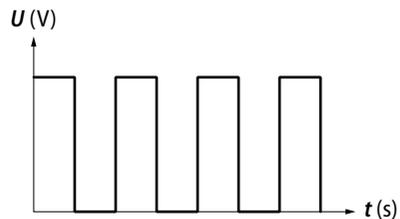
Lorsque le diamant de l'électrophone parcourt le microsillon, il génère un signal électrique analogue à la forme

du microsillon (d'où le terme « analogique ») : continu et pouvant prendre de nombreuses valeurs.

7 1. Une partition d'orgue de barbarie « ressemble » à la surface d'un CD dans le sens où on y trouve une succession de « trous » dans les deux cas (mais les dimensions de ces trous ne sont pas dans la même échelle de grandeur).

2. La « partition » est entraînée par le joueur grâce à une manivelle la plupart du temps. À l'intérieur de l'appareil, un mécanisme se déclenche à chaque passage d'un trou de la partition. Ce mécanisme permet alors l'ouverture d'un tuyau d'orgue dans lequel l'air, propulsé par un soufflet, s'engouffre. Cela produit alors un son. Plusieurs tuyaux d'orgue peuvent être commandés à la fois (cela dépend de la quantité de pistes sur la largeur de la partition). L'orgue de Barbarie n'est donc pas au sens propre un « instrument numérique ».

8 1. L'intensité lumineuse est proportionnelle à l'intensité électrique. Une alternance de 3 bandes noires et 4 bandes blanches d'égale largeur peut donc correspondre au signal ci-dessous.



2. Ce n'est pas parce qu'on a cette forme de signal qu'il s'agit d'un signal numérique. La génération de la trame impose cette allure au signal. Une image quelconque aura des nuances d'intensité lumineuse et donc de nombreuses valeurs de tension dans son signal électrique.

COMPÉTENCE 2 : Comprendre le principe de numérisation d'un signal

9 1. Faux. Plus la fréquence d'échantillonnage est grande, plus la numérisation sera précise.

2. Vrai.

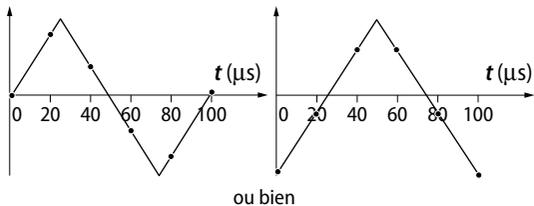
3. Faux. La fréquence d'échantillonnage doit être la plus grande possible.

10 1. c.

2. b.

3. b et c.

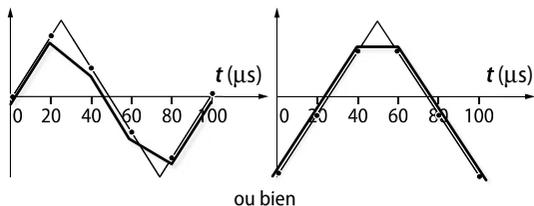
11 1. La fréquence d'échantillonnage est 5 fois plus grande que la fréquence du signal. On aura donc 5 intervalles régulièrement espacés par période. On a ainsi l'allure suivante pour le signal (par exemple) :



ou bien

(en noir, le signal d'origine, les points échantillonnés).

2. Si on reforme le signal à partir des points échantillonnés, on trouve les courbes ci-dessous :



ou bien

On ne retrouve donc pas la forme d'origine du signal.

3. Si on veut augmenter la précision de l'échantillonnage et se rapprocher davantage de la forme du signal, il faut augmenter la fréquence d'échantillonnage.

12 1. Avec 4 bits, on peut écrire $2^4 = 16$ valeurs différentes.

2. Le pas de quantification sera égal à $8/16 = 0,5$ V.

3. Les valeurs de tension sont arrondies aux valeurs numériques les plus proches. Ainsi :

- a. 3,10 V devient 3,0 V ;
- b. 5,05 V devient 5,0 V ;
- c. 6,88 V devient 7,0 V.

4. Puisque 8 V devient 7,5 V, l'erreur relative vaut alors $0,5/8 = 1/16 = 0,0625$ (6,25 %). Cette valeur ne dépend pas de l'intervalle de tension choisi : elle ne dépend que du nombre de bits choisis.

13 1. a. Le plus petit intervalle entre deux tensions est de 3 divisions, à raison de 0,5 mV par division. Le pas de quantification est donc de 1,5 mV.

b. Deux points successifs sont séparés horizontalement de 2 divisions. 1 division correspond à 0,10 ms. La période d'échantillonnage est donc $T_e = 0,20$ ms. On a donc $f_e = 1/T_e = 1/(2,0 \times 10^{-4}) = 5,0$ kHz.

c. Sur la courbe, on compte 7 intervalles de quantifications. On peut donc penser que la résolution est égale à 8 (il y a 8 valeurs de tension quantifiées).

2. Il faut résoudre l'équation $2^n = 8$. On voit que : $8 = 2 \times 2 \times 2$, d'où $n = 3$. Il y a 3 bits de quantification.

3. Entre $t_1 = 2,0$ ms et $t_2 = 2,2$ ms, on a une tension de 3 mV. Comme le pas de quantification est de 1,5 mV, cela correspond donc au nombre binaire : 010. C'est donc le codage a qui correspond.

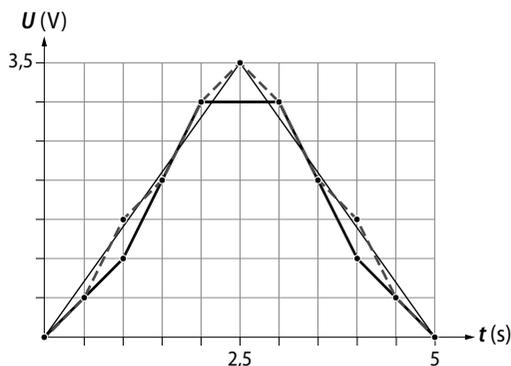
14 1. (Voir à la fin de l'exercice).

2. a. La période d'échantillonnage est de 1 ms. Il y a donc 5 intervalles d'échantillonnage sur 5 ms. En utilisant 2 bits entre 0 et 4 V, on a 4 valeurs de quantification avec un pas de $4/4 = 1$ V : 0 V ; 1,0 V ; 2,0 V et 3,0 V. Le signal recomposé à partir du numérique apparaît en trait plein noir.

b. La période d'échantillonnage est de 0,5 ms. Il y a donc 10 intervalles d'échantillonnage sur 5 ms. En utilisant 3 bits entre 0 et 4 V, on a 8 valeurs de quantification avec un pas de $4/8 = 0,5$ V : 0 ; 0,5 V ; 1,0 V ; ... ; 2,5 V ; 3,0 V et 3,5 V. Le signal recomposé à partir du numérique apparaît en trait pointillés gris.

3. a. Il s'agit du second signal (en pointillés gris), comme on peut le voir sur le graphique.

b. On pouvait s'y attendre car le signal numérique le plus précis est toujours celui pour lequel la fréquence d'échantillonnage est la plus élevée et le pas de quantification est le plus petit.



COMPÉTENCE 3 : Caractériser une transmission par son débit binaire

15 1. *Faux*. Plus le débit est grand, plus la numérisation est précise.

2. *Vrai*.

3. *Faux*. À fréquence d'échantillonnage constante, plus la résolution est petite et plus le débit binaire est petit.

17 1. Pour que la vidéo soit lue correctement, il faut que le débit binaire de la connexion soit égal ou supérieur au débit binaire de la vidéo, soit $1\,200$ kbit \cdot s $^{-1}$.

2. Si le débit de la connexion est plus faible, la vidéo sera lue de façon saccadée, dans le meilleur des cas.

3. a. La mise en mémoire tampon ne résout pas le problème puisque la mémoire va se « vider » (lors de la lecture) plus vite qu'elle ne se remplit.

b. La mise en mémoire de quelques secondes de vidéo permet de tamponner une courte baisse du débit de connexion, en dessous du débit binaire de la vidéo. On

parle d'ailleurs de mémoire « tampon ». Il suffit alors simplement que la moyenne du débit de connexion, pendant la durée mise en mémoire soit supérieure au débit binaire de la vidéo.

18 Test d'une clé USB

La plupart des clés USB actuelles utilisent une interface USB 2.0. Le débit binaire de cette interface peut atteindre $480 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$. Deux clés USB sont comparées : un fichier de 3,7 Go est écrit sur chacune. La durée de cette action est respectivement de 3 min 30 s et de 8 min 37 s.

1. Quel est le débit binaire moyen de chacune des clés ?
On calcule le débit binaire en faisant le rapport de la quantité de bits écrits par la durée nécessaire, sachant qu'un octet est constitué de 8 bits. Ainsi, le débit binaire de chacune des clés vaut :

$$D_1 = 8 \times 3\,700 / (3 \times 60 + 30) = 1,41 \times 10^2 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1};$$

$$D_2 = 8 \times 3\,700 / (8 \times 60 + 37) = 57,3 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}.$$

2. Combien de temps cela aurait-il duré avec le débit maximum de l'interface USB 2.0 ?

Si le débit avait été de $480 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$, le fichier aurait été écrit pendant la durée : $\Delta t = 8 \times 3\,700 / 480 = 61,7 \text{ s}$.

19 1. On applique la formule :

$$D = N \cdot k \cdot f_e = 2 \times 16 \times 44,1 \times 10^3 = 1,41 \times 10^6 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}.$$

2. La durée d'un CD est $t = 74 \text{ min} = 4\,440 \text{ s}$. Ainsi, un CD contient $n = 1,41 \times 10^6 \times 4\,440 = 6,27 \times 10^9$ bits de données musicales.

3. a. On fait un produit en croix :

$$n_{\text{données}} = 6,27 \times 10^9 \times 128 / 147$$

$$= 5,46 \times 10^9 \text{ bits de données.}$$

b. $n_{\text{données}} = 5,46 \times 10^9 / 8 = 6,82 \times 10^8 \text{ o}$;
ou $n_{\text{données}} = 6,82 \times 10^8 / 1\,024 = 6,66 \times 10^5 \text{ Kio}$;
ou bien encore

$$n_{\text{données}} = 6,66 \times 10^5 / 1\,024 = 6,50 \times 10^2 \text{ Mio} = 650 \text{ Mio},$$

valeur qui apparaît également sur les CD de 74 min.

4. Puisqu'au débit de base, la totalité des données n est lue pendant la durée $\Delta t = 74 \text{ min}$, alors le débit de base se calcule par $D = n / \Delta t = 6,66 \times 10^5 / 4\,440 = 150 \text{ Kio} \cdot \text{s}^{-1}$.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

20 1. a. La fréquence d'échantillonnage limite est égale au double de la fréquence du signal à échantillonner. Ainsi, $f_{e \text{ lim}} = 2 \times 3 = 6 \text{ kHz}$.

b. La fréquence d'échantillonnage doit être supérieure à $f_{e \text{ lim}}$.

2. a. Le pas de quantification est égal à $1/1\,000$ de la tension maximale. Il faut donc au moins 1 000 valeurs numériques différentes. Ainsi, il faudra effectuer la quantification sur au moins $k_{\text{min}} = 10$ bits car $2^{10} = 1\,024$.

b. Avec les valeurs calculées précédemment, on trouve que le débit binaire minimum requis vaut :

$$D_{\text{min}} = k_{\text{min}} \cdot f_{e \text{ lim}} = 10 \times 6 \text{ kHz} = 60 \text{ kbit} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Le débit binaire imposé sera donc suffisant.

c. La fréquence d'échantillonnage sera alors :

$$f_e = D / k_{\text{min}} = 72 / 10 = 7,2 \text{ kHz}.$$

21 1. Il y a $6/0,400 = 15$ intervalles de 400 mV, soit 16 commandes en tout avec 0.

2. Pour obtenir 16 valeurs différentes, il faut disposer de 4 bits car $2^4 = 16$.

3. Chaque valeur numérique de 4 bits devra être transmise en moins de 1,00 ms. Il faut donc un débit binaire d'au moins :

$$D = 4 / (1,00 \times 10^{-3}) = 4,00 \text{ kbits} \cdot \text{s}^{-1}.$$

22 1. Les caractères étaient codés sur 10 bits. On pouvait donc écrire $2^{10} = 1\,024$ caractères différents (en réalité, seuls 7 bits sur les 10 servaient réellement au codage, soit 128 caractères différents).

2. Chaque caractère représentait 10 bits dans la trame envoyée. Ainsi, un débit de $1\,200 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$ permettait l'envoi de 120 caractères à la seconde. La fréquence d'envoi des caractères était donc $f = 120 \text{ Hz}$.

3. Une page contient $25 \times 40 = 1\,000$ caractères. À raison de 120 caractères transmis à la seconde, il fallait donc $t = 1\,000 / 120 = 8,3$ secondes pour qu'une page entièrement remplie de texte s'affiche.

23 1. En ajoutant un bit de parité, la taille d'une commande passe de 6 à 7 bits. Le débit binaire doit donc être multiplié par un coefficient 7/6.

$$D' = 7 \times 9\,600 / 6 = 11\,200 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}.$$

2. L'ajout d'un bit de parité ne change pas la numérisation du signal. Ainsi, la fréquence d'échantillonnage est $f_e = D / k = 9\,600 / 6 = 1\,600 \text{ Hz}$.

3. Puisque 6 bits de données représentent une commande, alors avec un débit de $9\,600 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$ on pourra transmettre $9\,600 / 6 = 1\,600$ commandes par seconde (ce qui correspond à la fréquence d'échantillonnage).

24 1. Données principales transmises par le signal RDS :

- des informations routières en temps réel utilisées par certains terminaux de navigation (TMC) ;
- des données quelconques dont le format est libre ;
- le nom de la station écoutée ;
- toutes les fréquences des émetteurs d'une station (le changement d'accord est automatique lorsque l'auditeur se déplace vers un nouvel émetteur) ;
- un signal lors de la diffusion d'informations routières par une station dédiée (pour que le programme en cours cesse au profit de l'information diffusée) ;
- des signaux de pilotage de l'étage audio d'un récepteur RDS pour ajuster le décodage audio et le niveau

sonore selon le type de voie audio reçue (mono, stéréo, programme musical ou parlé...);

– un signal d'identification du type de programmes diffusé par une station RDS;

– l'heure et le jour;

– des messages longs de 64 caractères (uniquement sur les récepteurs RDS de salon);

– les paramètres RDS d'autres stations (EON);

– une radiomessagerie Alphapage-RDS;

– divers types de données numériques pour des services spécifiques;

– des informations d'urgence destinées à alerter la population en cas d'événements exceptionnels compromettant sa sécurité (tempêtes violentes, cyclone, tremblement de terre, accidents industriels graves...) (DOM-TOM, régions sismiques).

2. Le signal A est celui dont les caractéristiques se rapprochent le plus d'un signal numérique: il n'admet qu'un nombre limité de valeurs (il s'agit en réalité d'un signal numérique modulé).

3. Sur 104 bits envoyés, seuls $4 \times 16 = 64$ bits contiennent des données. Le débit binaire des données est donc:

$$D = 64 \times 1\,187,5/104 = 730,8 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}.$$

4. Avec 16 bits par trame, on peut coder $2^{16} = 65\,536$ valeurs différentes. Une trame de donnée peut donc prendre 65 536 valeurs différentes.

25 1. La luminance Y représente l'information sur l'intensité lumineuse « globale » apparente d'un pixel (c'est cette information qu'utilisaient les anciens téléviseurs « noir et blanc ») alors que les chrominances U et V (ou Cr et Cb) concernent l'intensité lumineuse de deux signaux colorés relativement au signal Y de référence (ce qui permet de retrouver la valeur du troisième).

2. a. Sur 10 bits, on peut générer $2^{10} = 1\,024$ valeurs différentes.

b. On doit ajouter les débits binaires de chaque composantes: $D = D_Y + D_U + D_V$ avec $D_Y = k_Y \cdot f_{eY}$; $D_U = k_U \cdot f_{eU}$; $D_V = k_V \cdot f_{eV}$; $k_Y = k_U = k_V = 10$.

Ainsi, $D = 10 \times (f_{eY} + f_{eU} + f_{eV})$
 $= 10 \times (13,5 + 6,75 + 6,75) = 270 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}.$

c. Le débit binaire calculé est environ 27 fois supérieur au débit maximum du DVD. Ce n'est donc pas compatible.

3. a. Le rapport entre les deux débits est de 27. Même sur 1 bit (ce qui ne représente aucun intérêt) le débit binaire de la vidéo ne peut pas descendre au niveau de celui du DVD.

b. Le facteur de compression de l'encodage MPEG-2 doit donc être d'au moins 27 pour que la vidéo puisse être lisible sur un DVD.

26 La vraie structure des données sur un CD

La plus petite entité de donnée d'un CD est appelée une trame, elle correspond à 33 octets (1 octet = 8 bits) et contient 24 octets d'échantillons musicaux en stéréo. Les 9 octets restants correspondent à 8 octets de correction de type CIRC et un octet de sous-code utilisé pour le contrôle et l'affichage. Chaque octet est converti en un mot de 17 bits. Ainsi, au total il ya $33 \times 17 = 561$ bits. Un mot de 27 bits est ajouté à la trame pour la synchronisation. Chaque secteur contient 98 trames. Le CD est lu à la vitesse de 75 secteurs par seconde.

1. a. Combien y a-t-il d'octets dans 1 secteur ?

Un secteur contient 98 trames de $561 + 27 = 588$ bits. Il y a donc $n_1 = 98 \times 588/8 = 7\,203$ o par secteur.

b. Combien y a-t-il d'octets de données musicales dans un secteur ?

Une trame ne contient que 24 octets de données musicales. Il y a donc $n_2 = 98 \times 24 = 2\,352$ o de données musicales par secteur.

2. a. Quel est le débit binaire ?

75 secteurs sont lus par seconde.

Ainsi $D_1 = 7\,203 \times 8 \times 75 = 4,321\,8 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}.$

b. Quel est le débit binaire des données musicales ?

De même: $D_2 = 2\,352 \times 8 \times 75 = 1,411\,2 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}.$

3. La fréquence d'échantillonnage d'un CD est de 44 100 Hz par canal (stéréo). Combien y a-t-il de bits de quantification ?

Le débit binaire d'un canal est donc:

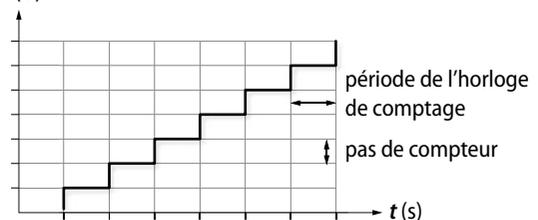
$$D = 1,411\,2 \times 10^6/2 = 705,6 \text{ kbit} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Ainsi, nombre de bits de quantification k se calcule par:

$$k = D/f_e = 7,056 \times 10^5/(4,41 \times 10^4) = 16 \text{ bits}.$$

27 1.

U (V)



2. Il s'agit toujours de comparer la tension à numériser à une tension de référence associée à une valeur numérique binaire. La différence principale vient du fait que dans ce cas, la tension de référence augmente jusqu'à atteindre la tension à numériser au lieu de l'atteindre par itération.

3. a. Sur 8 bits, on peut écrire $2^8 = 256$ valeurs différentes. Si la fréquence du compteur est de 1,00 MHz, alors il faudra une durée $\Delta t = 256/(1,00 \times 10^6) = 256 \mu\text{s}$ pour compter toutes les valeurs. La période d'échantillonnage doit être supérieure à $256 \mu\text{s}$ pour permettre à l'étage de quantification d'avoir le temps de remplir

son rôle. Ainsi, la fréquence d'échantillonnage doit être plus petite que $f_{e \text{ lim}}$ avec :

$$f_{e \text{ lim}} = 1/(256 \times 10^{-6}) = 3,91 \text{ kHz.}$$

Le débit binaire sera :

$$D = k \cdot f_{e \text{ lim}} = 8 \times 3,91 \times 10^3 = 31,25 \text{ kbit} \cdot \text{s}^{-1}.$$

b. Sur 16 bits, on peut écrire $2^{16} = 65\,536$ valeurs différentes. Si la fréquence du compteur est de 1,00 MHz, alors il faudra une durée $\Delta t = 65\,536/(1,00 \times 10^6) = 65,5$ ms pour compter toutes les valeurs. La période d'échantillonnage doit être supérieure à 65,5 ms pour permettre à l'étape de quantification d'avoir le temps de remplir son rôle. Ainsi, la fréquence d'échantillonnage doit être plus petite que $f_{e \text{ lim}}$ avec $f_{e \text{ lim}} = 1/(65,5 \times 10^{-3}) = 15,3$ Hz. Le débit binaire sera $D = k \cdot f_{e \text{ lim}} = 244 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$.

c. On voit que la fréquence d'échantillonnage et le débit binaire chutent rapidement si on augmente le nombre de bits de quantification : on divise par 2 à chaque bit ajouté. Ce mode est peu utilisé à cause de cela. Par comparaison avec la méthode vue en activité, l'ajout d'un bit demande juste une période d'horloge de quantification en plus, ainsi lorsqu'on passe de 8 à 16 bits, la fréquence d'échantillonnage et le débit binaire sont seulement divisés par 2.

EN ROUTE POUR LE SUPÉRIEUR

28 1. On a $D_{\text{SACD}} = k_{\text{SACD}} \cdot f_{e \text{ SACD}} = 1 \times 2,82 \times 10^6 = 2,82 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$.

2. $D_{\text{CD}} = k_{\text{CD}} \cdot f_{e \text{ CD}} = (16 \times k_{\text{SACD}}) \times (f_{e \text{ SACD}}/64) = D_{\text{SACD}}/4 = 704 \text{ kbit} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. a. Le pas de quantification, contrairement aux méthodes étudiées précédemment, ne dépend pas du nombre de bits de quantification (puisque'il n'y a qu'un bit obligatoirement).

b. Avec une quantification « classique », l'amplitude maximum U_{max} , la résolution R et le pas de quantification Δ sont liés par la relation : $R = U_{\text{max}}/\Delta$.

La condition donnée impose $\Delta \cdot f_e > U_{\text{max}} \Leftrightarrow f_e > U_{\text{max}}/\Delta$ soit $f_e > R$. On peut donc théoriquement prendre pour valeur limite $R_{\text{lim}} = f_e = 2,82 \times 10^6$. Or $2^{21} = 2,097 \times 10^6$. Donc une quantification avec 21 bits respecte pratiquement la seule condition imposée. Étant donné que c'est la seule limite pour fixer Δ , la précision de cette méthode est donc très grande.

Images numériques et stockage optique

Le programme

Notions et contenus	Compétences attendues
Image numérique – Caractéristiques d'une image numérique : pixellisation, codage RVB et niveaux de gris.	– Associer un tableau de nombres à une image numérique. – <i>Mettre en œuvre un protocole expérimental utilisant un capteur (caméra ou appareil photo numérique par exemple) pour étudier un phénomène optique.</i>
Stockage optique – Écriture et lecture des données sur un disque optique. – Capacités de stockage.	– Expliquer le principe de la lecture par une approche interférentielle. – Relier la capacité de stockage et son évolution au phénomène de diffraction.

Les compétences à acquérir dans la séquence

1. Caractériser une image numérique.
2. Expliquer le principe de lecture d'un disque optique.
3. Comprendre la capacité de stockage.

Évaluation diagnostique p. 534

SITUATION 1

L'objectif est ici de rappeler le principe de la synthèse additive des couleurs qui sera utilisé pour coder la couleur d'un pixel d'une image numérique.

Les trois couleurs primaires sont le bleu, le rouge et le vert. Les couleurs secondaires sont le cyan (addition vert et bleu), le jaune (addition rouge et vert) et le magenta (addition rouge et bleu). La couleur centrale de la rosace, qui correspond à l'addition des lumières rouge, verte et bleue, est le blanc.

La synthèse additive des couleurs sera utilisée et vérifiée expérimentalement dans l'**activité 1**.

SITUATION 2

L'objectif est d'introduire le composant de base des images numériques : le pixel.

Les cases de cette image numérique sont appelées pixel. Pour améliorer la qualité de cette image, on peut augmenter le nombre de pixels la constituant.

La notion de pixel est introduite et exploitée dans l'**activité 1**.

SITUATION 3

L'objectif est d'amorcer la réflexion sur la capacité de stockage des disques optiques.

Le Blu-ray Disc permet de stocker des films en haute définition, ce qui n'est pas le cas du DVD. On peut donc stocker plus d'informations sur ce support que sur un DVD, le format de ces deux disques étant le même.

La notion de capacité de stockage et sa limitation par le phénomène de diffraction est traitée dans l'**activité 3**.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

Images numériques

p. 536

1. Caractéristiques d'une image numérique

1. Une image acquise par un appareil photographique numérique et une image stockée sur une clé USB sont des exemples d'image numérique.

– Dans l'onglet « propriétés de l'image », sont indiqués : la taille sur le disque en Ko (kilo-octet), la résolution en ppp (point par pouce), le nombre de pixels (symbole px) en hauteur et en largeur.

– En agrandissant l'image, on voit apparaître des petits carrés sur l'image. L'image devient un peu floue, on ne distingue plus les contours.

2. a. Les nuances de la palette sont créées à partir des couleurs primaires : rouge, vert et bleu.
- b. La valeur maximale des nombres indiqués pour chaque couleur est 255, la valeur minimale est 0.
3. Il faut multiplier le nombre de pixels en largeur par celui en longueur pour calculer le nombre total de pixels de l'image donc sa définition.
4. Une image pixelisée est une image dont les pixels sont apparents.
On obtient une image pixelisée lorsque l'on agrandit une image ou quand le nombre de pixels d'une image est insuffisant.
5. On attribue un nombre binaire de 8 bits à chaque couleur primaire. Il y a $2^8 = 256$ nombres possibles pour chaque couleur primaire. Ces nombres sont numérotés de 0 à 255 dans les logiciels de traitement d'image.
6. Une image numérique est subdivisée en pixels. Chaque pixel est codé par un nombre binaire. Une image numérique est donc un tableau de nombres binaires, le nombre de colonnes et de lignes étant égal au nombre de pixels en largeur et en longueur.

2. Principe d'acquisition d'une image numérique

1. Il faut superposer les images de la scène prises avec le filtre bleu, le filtre vert et le filtre rouge.
2. a. Ce sont des filtres bleu, vert et rouge qui sont disposés sur les capteurs.
- b. Pour l'acquisition d'une image numérique en couleur, on utilise trois filtres : rouge, vert et bleu. Ces trois filtres vont servir à attribuer à chaque pixel un nombre binaire pour le rouge le vert et le bleu afin de coder numériquement la couleur du pixel. On parle donc de codage RVB.

ACTIVITÉ 2

Lecture optique d'un CD

p. 537

1. a. Le CD est une rondelle de plastique recouverte d'une fine couche métallique réfléchissante de 12 cm de diamètre et de 1,2 cm d'épaisseur qui peut contenir 74 min de données audio ou 700 Mo de données numériques par face.
- b. L'information est codée sous forme numérique (succession de 0 et de 1 du langage binaire).
2. On exploite la réflexion de la lumière et les interférences lumineuses dans le procédé de lecture optique d'un CD.
3. a. On a des interférences constructives lorsque deux ondes monochromatiques de même longueur d'onde et en phase se superposent.
On a des interférences destructives lorsque deux ondes monochromatiques de même longueur d'onde et en opposition de phase se superposent.

- b. Il s'agit des interférences destructives entre la lumière réfléchi par le creux et celle réfléchi par le plat.
- c. Sachant que l'onde fait un aller-retour dans le creux de profondeur $\lambda/4$, elle a parcouru $2\lambda/4 = \lambda/2$ de plus que l'onde réfléchi par le plat. Lorsque deux ondes monochromatiques de même longueur d'onde ont parcouru une différence de trajet de $\lambda/2$, elles sont en opposition de phase et interfèrent de manière destructive, ce qui est cohérent avec la réponse précédente.

4. On parle de disque optique pour un CD car la lecture du disque exploite des phénomènes optiques.

5. Les interférences destructives dans un creux provoquent une baisse d'intensité de la lumière captée par la photodiode. Cette baisse d'intensité à la transition entre un creux et un plat code le bit 1, une intensité constante code elle le bit 0.

Le codage binaire correspondant à la structure du CD représentée est : 001001000100001001000

ACTIVITÉ 3

Capacité de stockage

p. 538

1. a. On l'appelle aussi « objectif » en référence aux instruments d'optique.
- b. On caractérise la lentille par son ouverture numérique N .
2. Le faisceau laser ne se concentre pas en un point mais en une tache, du fait de la nature ondulatoire de la lumière.
3. La formule du diamètre de la tache (proportionnelle à la longueur d'onde λ de la lumière incidente et inversement proportionnelle à la « dimension » N de la lentille) et l'allure de la tache (maxima de luminosité au centre entouré de minima) font penser au phénomène de diffraction de la lumière.
4. Si la lentille est identique, N est identique. D est proportionnel à λ ; or $\lambda_{\text{bleu}} < \lambda_{\text{rouge}}$ donc $D_{\text{bleu}} < D_{\text{rouge}}$.
5. a. C'est le phénomène de diffraction qui limite la capacité de stockage des disques optiques.
- b. Il dépend de la longueur d'onde du laser et des caractéristiques de la lentille convergente utilisée pour concentrer le faisceau laser.
6. Le fait que le faisceau laser ne se concentre pas en un point mais en une tache implique que les creux gravés par laser ont une taille minimale et que les pistes doivent être assez éloignées les unes des autres, pour que le spot laser ne lise pas deux pistes en même temps.
7. Le faisceau laser utilisé pour la lecture d'un CD doit avoir une longueur d'onde supérieure à celle du laser utilisé pour la lecture d'un DVD.

EXERCICES

COMPÉTENCE 1 : *Caractériser une image numérique*

1 1. a et b.

2. a.

3. a (entre autres), b et c.

2 1. Une image numérique est acquise, traitée et/ou stockée en langage binaire.

On peut citer, par exemple, une image acquise avec un appareil photographique numérique et une image publiée sur Internet.

2. L'artiste s'est inspiré des pixels qui sont ici modélisés par les post-it. Un pixel est le plus petit élément constitutif de l'image.

3. Plus le nombre de pixels composant l'image est élevé (par unité de longueur) et plus l'image numérique sera de bonne qualité.

3 1. Les informations d'une image numérique sont codées en langage binaire (succession de « 0 » et de « 1 »).

2. a. Il y a $2^8 = 256$ nombres possibles, donc 256 nuances de gris possibles qui sont ici numérotées de 0 (noir) à 255 (blanc).

b. On associe à chaque pixel un nombre binaire, ici un octet pour une image en nuances de gris.

Une image numérique est un tableau de nombres binaires. Dans chaque case du tableau se trouve(nt) le(s) nombre(s) binaire(s) qui code(nt) un pixel de l'image.

4 1. Il s'agit du nombre de pixels (noté px).

2. Le nombre de pixels augmente du format **1** au format **3**, la taille de l'image restant la même.

La qualité de l'image augmente du format **1** au format **3**, ce qui explique les conseils donnés : impression ou utilisation sur un support de plus en plus grand, du format **1** au format **3**.

3. a. Puisque le nombre de pixels augmente du format **1** au format **3**, la quantité de nombres binaires pour coder l'image augmente du format **1** au format **3**.

b. Une carte mémoire peut contenir un certain nombre de bits. Le nombre de bits nécessaires pour coder une image augmentant du format **1** au format **3**, on peut placer plus d'images du format **1** sur la carte mémoire que du format **2**, puis du format **3**.

5 1. a. Il s'agit du codage RVB (rouge, vert et bleu) des couleurs.

b. Ce codage se base sur la synthèse additive des couleurs :

bleu + vert + rouge = blanc

bleu + vert = cyan

vert + rouge = jaune

rouge + bleu = magenta

2. Pour le cyan (addition lumières bleue et verte) :
B : 255, V : 255 et R : 0.

Pour le blanc (addition lumières bleue, verte et rouge) :
B : 255, V : 255 et R : 255.

Pour le noir (pas de lumière) : B : 0, V : 0 et R : 0.

Pour le vert : B : 0, V : 255 et R : 0.

3. Une image numérique est un tableau de nombres binaires. Dans chaque case se trouvent les nombres binaires codant la couleur d'un pixel. Modifier la couleur d'un pixel revient à modifier les nombres binaires de la case correspondante.

COMPÉTENCE 2 : *Expliquer le principe de lecture d'un disque optique*

6 1. *Faux*. Les informations sont codées de façon numérique.

2. *Vrai*.

3. *Faux*. C'est le passage d'un creux à un plat, et inversement, qui code le bit 1, le bit 0 correspondant au faisceau laser restant sur un plat ou sur un creux.

7 1. Le langage binaire inscrit sur le disque optique.

2. Elle sert à réfléchir le faisceau laser.

3. Il y a une chute de l'intensité lumineuse réfléchie du fait des interférences destructives entre le faisceau réfléchi par un plat et celui réfléchi par un creux.

8 1. Les coupelles sont les creux gravés sur la piste d'un disque optique comme le CD.

Le morse optique du codage numérique sous-entend les 0 et les 1 du langage binaire. Ils font référence au morse, un système de codage qui se base sur deux types de son (long et court).

Les 33-tours sont un type de disque vinyle, un autre support d'enregistrement et de restitution du son.

2. Le phénomène responsable de l'extinction dans le cas du CD est le phénomène d'interférences destructives entre le faisceau réfléchi par un creux et celui réfléchi par un plat quand le faisceau laser arrive sur le bord d'un creux.

3. L'autre système à lecture optique cité dans le texte est les codes-barres.

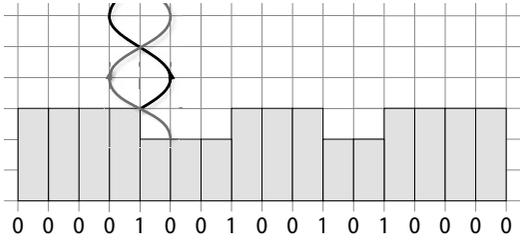
4. Dans un CD-R, l'extinction est causée par l'absorption de la lumière par une tache sombre.

9 1. La sinusoïde représente le faisceau laser réfléchi par un creux.

2. a. Il y a interférences destructives entre le faisceau réfléchi par le creux et celui réfléchi par le plat.

b. Les ondes doivent être en opposition de phase.

c. et 3. Voir schéma.



4. Pour avoir deux bits 1 successifs, il faudrait deux variations de lumière successives, ce qui n'est pas possible.

COMPÉTENCE 3 : Comprendre la capacité de stockage

11 1. b et c.

2. a et c.

3. b.

12 1. C'est la quantité d'informations qu'il peut contenir pour un format donné.

2. La capacité de stockage est limitée par la tache de diffraction du faisceau laser utilisé. Or, plus la longueur d'onde du faisceau laser est petite, plus la tache est petite et plus le nombre d'informations inscrites et lisibles est important. On peut donc en théorie stocker plus d'informations avec un laser de longueur d'onde $\lambda = 385$ nm qu'avec un laser de longueur d'onde $\lambda = 405$ nm.

13 1. L'unité de stockage indiquée est le Go pour gigaoctet, un octet étant un nombre binaire de 8 bits. En effet, l'information sur les disques optiques est codée en langage binaire.

2. Les taches de couleur représentent la tache de diffraction du faisceau laser concentré sur le disque optique.

3. La dimension de cette tache de diffraction dépend de la longueur d'onde du faisceau laser.

4. Plus la longueur d'onde du faisceau laser utilisé est petite et plus la tache de diffraction est petite. On peut donc conclure que les lasers utilisés pour ces supports sont tels que $\lambda(\text{CD}) > \lambda(\text{DVD}) > \lambda(\text{Blu-ray Disc})$.

15 1. Le phénomène est la diffraction : lorsque le faisceau laser est concentré sur un disque optique, il ne se concentre pas en un point mais en une tache de diffraction.

2. Le tracé de d en fonction de λ est une droite qui passe par l'origine. Les grandeurs d et λ sont proportionnelles.

3. La capacité de stockage d'un disque optique est limitée par la tache de diffraction du faisceau laser concentré sur le disque. Plus la longueur d'onde du faisceau

laser est petite, plus la tache est petite et le nombre d'informations inscrites et lisibles est important.

4. Pour un laser de longueur d'onde $\lambda = 600$ nm, le diamètre d de la tache de diffraction est $d = 1\,122$ nm (obtenu en reportant la valeur de λ sur la droite de la question 2.).

La distance minimale entre deux inscriptions doit être de $d/2$, soit 561 nm, pour que le laser ne lise pas les deux inscriptions en même temps.

EXERCICES DE SYNTHÈSE

16 Lecture optique : interférences, réflexion.

Écriture de données sur un disque optique : diffraction, codage binaire.

Augmentation de la capacité de stockage d'un disque optique : diffraction.

Codage d'une image numérique : pixellisation, synthèse additive, codage binaire.

17 Caractéristiques identiques pour un CD et un DVD : a, c, d et g.

Caractéristiques différentes pour un CD et un DVD : b, e, f et h.

18 1. « 4 000 × 3 000 » indique le nombre de pixels en longueur et en largeur, de l'image.

« 5,71 Mo », le nombre de bits utilisés pour coder l'image.

2. a. Le tableau répertorie l'ensemble des nombres binaires codant chaque pixel de l'image. Une case du tableau renferme les nombres binaires codant un pixel.

b. Le tableau aura 4 000 colonnes (nombre de pixels en longueur) et 3 000 lignes (nombre de pixels en largeur).

3. a. Le nombre total de pixels (4 000 × 3 000) et le nombre de bits utilisés pour coder l'image (5,71 Mo) ne changeront pas. Le tableau de nombres changera puisque les couleurs des pixels, donc les nombres binaires codant ces couleurs seront modifiés.

b. Pour un agrandissement, le nombre total de pixels, le nombre total de bits et le tableau resteront inchangés.

19 1. Pour le LaserDisc, les vidéos et le son sont enregistrés sous forme analogique alors que pour le DVD, les informations sont sous forme numérique (en langage binaire).

2. Le point commun entre ces deux supports est la lecture optique par un laser. La lecture optique se base sur la réflexion de la lumière et les interférences lumineuses.

3. a. La capacité de stockage est la quantité d'informations que peut contenir un support.

b. On peut stocker plus d'informations sur un DVD que sur un LaserDisc. En effet, ce dernier ne peut contenir

que 30 à 60 min de film par face alors qu'un DVD peut contenir un film entier par face.

4. Si les données étaient numériques et que le Laser-Disc avait le même format que le DVD, on pourrait quand même stocker moins d'informations, le laser utilisé pour le LaserDisc ayant une longueur d'onde supérieure à celle du DVD donc une tache de diffraction plus grande.

20 1. Les creux matérialisent les informations codées en langage binaire.

2. On parle de gravure de disque car on creuse des trous dans le disque en se basant sur la lumière laser.

3. a. La diffraction de la lumière limite la capacité de stockage des données d'un disque optique.

b. La diffraction va intervenir dans l'étape **2**, la tache de diffraction va en effet limiter la taille des creux sur le disque.

4. Il s'agit de l'étape **5**. En effet, il faut qu'il y ait réflexion de la lumière pour la lecture optique d'un disque par laser.

21 DVD double couche

Dans un DVD double couche, les informations sont inscrites sur deux couches superposées. Pour la lecture optique de ces DVD, on peut utiliser un laser à deux longueurs d'onde, une de 635 nm pour lire la couche la plus profonde, une de 650 nm pour lire la couche la plus proche. La couche profonde est recouverte d'une surface argentée, la couche proche d'une surface dorée semi-réfléchissante.

1. Pourquoi les couches sont recouvertes de surfaces réfléchissantes ?

Les couches sont recouvertes d'une surface réfléchissante pour réfléchir la lumière lors de la lecture optique par laser du disque.

2. Pourquoi peut-on théoriquement placer plus de données sur la couche profonde ?

Le laser utilisé pour la lecture de la couche la plus profonde a une longueur d'onde plus petite que celui utilisé pour la lecture de la couche proche. On peut donc distinguer par lecture optique des inscriptions plus fines sur la couche profonde, donc placer plus d'informations sur cette couche.

3. Quelle autre solution existe pour augmenter la capacité de stockage d'un disque optique ?

Pour stocker plus d'informations sur le DVD, on peut utiliser un laser bleu pour l'écriture et la lecture du disque, la tache de diffraction étant plus petite pour un laser bleu qu'un laser rouge.

22 1. a. Un pixel est le plus petit élément constitutif d'une image numérique.

b. Il y a sept fois plus de pixels dans une image « haute définition ».

2. Ils les nomme « microcoupelle » en référence aux creux et du fait de leurs tailles (micro).

3. « Des microcoupelles chargées de réfléchir, ou non, le faisceau et, par cette alternance de réflexion et d'absorption, de restituer les 0 et les 1 du codage numérique ».

4. a. « En effet, en optique, un éclairage sous une lumière de longueur d'onde donnée ne permet pas de distinguer des éléments de taille inférieure à cette dernière ».

b. Cette phrase fait allusion au phénomène de diffraction de la lumière.

c. Ce problème a été surmonté en réduisant la longueur d'onde du faisceau laser utilisé, ce qui permet de réduire la taille de la tache de diffraction et donc de stocker plus de données sur le disque.

23 1. Diode laser – miroir semi-transparent – lentille – CD – lentille – miroir semi-transparent – photodiode.

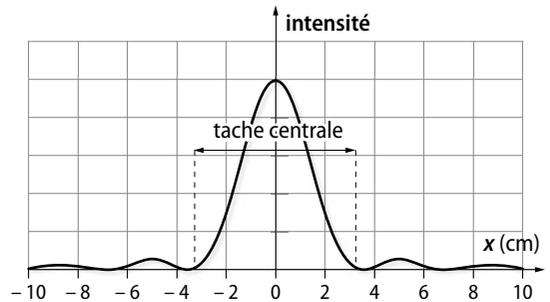
2. Lorsque le faisceau laser passe d'un creux à un plat, l'intensité lumineuse varie brusquement (elle augmente). Lorsque le faisceau laser reste sur un creux ou sur un plat, l'intensité lumineuse reste constante (forte sur un plat, plus faible sur un creux).

3. a. Le faisceau laser réfléchi par le creux a fait un aller-retour dans le creux de plus que le faisceau réfléchi par le plat. Un aller-retour dans un creux de profondeur $\lambda/4$ correspond à une distance de $2 \times \lambda/4 = \lambda/2$.

b. Deux faisceaux décalés de $\lambda/2$ sont en opposition de phase et interfèrent de manière destructive. (voir **fig. 5** du cours).

24 1. On mesure la tache centrale de diffraction entre les centres des deux zones d'extinction encadrant la tache centrale.

2.



3. On voit sur la courbe représentant l'intensité en fonction de la distance, que l'extinction se situe en un point et non en une zone. Les points d'extinction sont situés au centre des zones sombres que l'on observe à l'œil nu.

4. On a plus de précision sur la mesure en utilisant une caméra numérique.

5. On a 50 pixels par cm :

- en longueur : 50×20 cm donc 1 000 pixels ;
- en largeur : $50 \times 2,7$ donc 135 pixels.

D'où une définition de $1\,000 \times 135 = 135\,000$ pixels.

25 1. La profondeur des creux est égale à $\lambda/4$.

Un aller-retour dans un creux de profondeur $\lambda/4$ correspond à une distance de $2 \times \lambda/4 = \lambda/2$.

Deux faisceaux décalés de $\lambda/2$ sont en opposition de phase et interfèrent de manière destructive, ce qui code le bit 1.

2. a. $d = 1,22 \times 405 \times 10^{-9} / 0,85 = 5,8 \times 10^{-7} \text{ m} = 580 \text{ nm}$.

b. Entre une piste et les deux qui l'entourent, il y a :

$$320 \times 2 = 640 \text{ nm},$$

ce qui est inférieur au diamètre de la tache centrale de diffraction. La tache ne « déborde » donc pas sur les autres pistes.

c. Pour augmenter la capacité de stockage, il faut diminuer le diamètre de la tache centrale de diffraction, donc on peut diminuer la longueur d'onde λ ou augmenter l'ouverture numérique N de la lentille (voir formule du 2.).

3. a. Un bit est nécessaire pour coder un pixel : 0 pour le noir et 1 pour le blanc (ou inversement).

b. Une image de définition 640×480 en noir et blanc nécessite 640×480 bits, soit 307 200 bits en tout.

On peut donc stocker :

$$25 \times 10^9 \times 8 / 307\,200 = 651\,042 \text{ photos.}$$

26 1. Voir cours.

2. Sur les images classiques : 8 bits/couleur, donc :

$$8 \times 3 = 24 \text{ bits pour un coder un pixel.}$$

Sur les images HDR : 16 bits/couleur, donc :

$$16 \times 3 = 48 \text{ bits pour coder un pixel.}$$

3. Pour les images classiques : 2^{24} , donc environ 17 millions de couleurs possibles.

Pour les images HDR : $2^{48} \approx 3 \times 10^{14}$ couleurs possibles.

4. Ils sont organisés en tableau, chaque case contenant les nombres binaires codant un pixel.

5. Pour une image classique : 3 octets/pixels, donc :

$$3 \times 800 \times 450 = 1,08 \times 10^6 \text{ octets.}$$

Pour une image HDR : 6 octets/pixels, donc :

$$6 \times 800 \times 450 = 2,16 \times 10^6 \text{ octets.}$$

6. Les images HDR sont codées par un très grand nombre de bits (48 par pixel) et nécessitent de travailler avec des tableaux à 48 bits par case, ce qui complique le travail des logiciels de traitement d'images.

7. On peut les traiter comme la superposition de photographies.

EN ROUTE VERS LE SUPÉRIEUR

27 1. a. Plus la longueur d'onde du laser utilisé pour la lecture et l'écriture d'un disque optique est petite et plus on peut stocker d'informations sur un disque optique, donc plus la capacité de stockage augmente.

b. Les Blu-ray Disc utilisent un laser de 405 nm. Si on diminue la longueur d'onde, on arrive rapidement au domaine des UV qui dégradent le disque. On atteint donc les limites dans la diminution de la longueur d'onde du faisceau laser avec les Blu-ray Disc.

2. Les informations sont inscrites et lues en utilisant des phénomènes optiques.

3. Pour les disques holographiques, on utilise les interférences pour inscrire l'information.

Pour les disques optiques, on utilise les interférences destructives pour lire l'information inscrite.

1 1. La consommation énergétique finale mondiale augmente, tandis que les ressources fossiles diminuent. L'utilisation des hydrocarbures augmente la pollution et l'effet de serre.

2. Les solutions consistent à développer les énergies renouvelables et à faire des économies d'énergie.

2 1. a. Le dichlorométhane ayant une faible miscibilité avec l'eau, il ne se mélange pas avec celle-ci. En revanche, l'eugénol est miscible dans le dichlorométhane. On obtient un mélange hétérogène présentant deux phases : la phase aqueuse et la phase organique.

b. La densité du dichlorométhane est de 1,34 ; elle est supérieure à celle de l'eau ($d = 1,00$). La phase organique se trouve en bas.

c. L'eugénol étant très soluble dans le dichlorométhane et peu soluble dans l'eau, il se retrouve dans la phase organique.

d. L'eugénol possède une plus faible solubilité dans l'eau salée que dans l'eau. En ajoutant de l'eau salée, on diminue fortement la quantité d'eugénol restante dans la phase aqueuse.

e. Pour réaliser une extraction par solvant, il faut que celui-ci soit non miscible à l'eau, et il faut que l'espèce à extraire y soit plus soluble que dans l'eau.

L'éthanol n'est pas utilisable car il est miscible à l'eau : on obtiendrait une seule phase.

Le cyclohexane convient : il est peu miscible à l'eau (deux phases différentes) et l'eugénol est très soluble dans le cyclohexane.

2. Le montage à reflux permet d'augmenter la température du milieu réactionnel et donc d'augmenter la vitesse de réaction en évitant les pertes de matière.

3. L'acide orthophosphorique permet d'augmenter la vitesse de réaction.

4. L'acétate d'isoeugénol qui se forme est insoluble dans l'eau glacée. Il précipite et apparaît sous forme de cristaux solides. On le récupère par filtration sur Büchner.

5. a. Quantité de matière initiale d'isoeugénol :

$$n_1 = \frac{m}{M} = \frac{10,0}{164} = 6,10 \times 10^{-2} \text{ mol.}$$

Quantité de matière initiale d'anhydride éthanóique :

$$d = \frac{\rho_{\text{anhydride}}}{\rho_{\text{eau}}} \text{ et } m = \rho_{\text{anhydride}} \cdot V = d \cdot \rho_{\text{eau}} \cdot V.$$

$$n_2 = \frac{d \cdot \rho_{\text{eau}} \cdot V}{M} = \frac{1,08 \times 1,00 \times 20,0}{102} = 0,212 \text{ mol.}$$

b. D'après les coefficients stoechiométriques de l'équation, comme $n_1 < n_2$, alors le réactif limitant est l'isoeugénol et $x_{\text{max}} = n_1 = 6,10 \times 10^{-2} \text{ mol.}$

$$x_f = n_{\text{acétate isoeugénol}} = \frac{m}{M} = \frac{11,3}{205} = 5,51 \times 10^{-2} \text{ mol, donc}$$

$$\text{le rendement est } R = \frac{5,51 \times 10^{-2}}{6,10 \times 10^{-2}} = 90,4 \text{ \%.}$$

3 1. Il est nécessaire de faire le blanc car le spectrophotomètre ne doit pas tenir compte de l'absorbance du solvant (l'eau) et de celle de la cuve.

2. La courbe obtenue est une droite passant par l'origine ce qui est en accord avec la loi de Beer-Lambert $A = k \cdot [\text{Cu}^{2+}]$.

3. Pour $A = 1,5$, on lit sur la courbe $[\text{Cu}^{2+}]_S = 0,13 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. La solution S' a été obtenue par dilution de la solution S : $[\text{Cu}^{2+}]_{S'} = 0,13 \times 50,0/25,0 = 0,26 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

4. Il s'agit d'un dosage par étalonnage, car on a mesuré l'absorbance de solutions de concentrations connues afin de réaliser une droite d'étalonnage.

Lors d'un dosage par titrage, l'espèce titrée est consommée. Ici, les ions Cu^{2+} n'ont pas réagi.



2. L'équivalence lors d'un dosage conductimétrique correspond au point d'intersection des deux portions de droites, soit $V_E = 11,2 \text{ mL}$.

3. À l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stoechiométriques, soit :

$$n_{\text{H}_3\text{O}^+ \text{ initiale}} = n_{\text{HO}^- \text{ versée}}$$

$$C_1 \cdot V_1 = C_B \cdot V_E$$

$$C_1 = \frac{C_B \cdot V_E}{V_1}$$

$$C_1 = \frac{1,00 \times 10^{-1} \times 11,2}{100,0} = 11,2 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

4. La solution S_0 a été diluée 1 000 fois, donc :

$$C_0 = 1\,000 \times C_1 = 11,2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

5. a. $\text{HCl} (\text{g}) + \text{H}_2\text{O} (\text{l}) \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq}) + \text{Cl}^- (\text{aq}).$

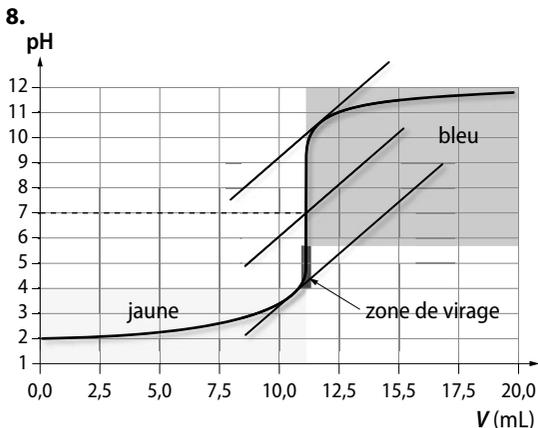
b. $m_0 = n_0 \cdot M_{\text{HCl}} = C_0 \cdot V \cdot M_{\text{HCl}}$
 $m_0 = 11,2 \times 1 \times 36,5 = 409 \text{ g.}$

6. $m = \rho_0 \cdot V = 1\,160 \times 1,000 = 1\,160 \text{ g.}$

7. a. Pour 1 160 g de solution, on a 409 g d'acide chlorhydrique, donc pour 100 g on aura :

$$p = \frac{409 \times 100}{1\,160} = 35,3 \text{ \%.}$$

b. Même si on trouve un pourcentage légèrement supérieur à celui donné par l'étiquette, celle-ci indiquant le pourcentage minimum en masse d'acide, l'indication est correcte.



Le vert de bromocrésol va colorer la solution initialement acide en jaune, puis celle-ci va devenir verte (teinte sensible de l'indicateur) autour de l'équivalence, puis après l'équivalence la solution se colore en bleu.

9. Le pH à l'équivalence est égal à 7,0 (méthode des tangentes). Le bleu de bromothymol serait mieux adapté pour le titrage car sa zone de virage contient le pH à l'équivalence, ce qui n'est pas le cas du vert de bromocrésol.

5 1. Les canaux de transmissions sont le réseau électrique et le réseau télécom.

2. Signaux électriques et éventuellement de la lumière si le réseau télécom est à fibre optique.

3. Il s'agit d'une propagation guidée.

B. Dans la technologie CPL, les données sont transmises sous forme numérique : un « 1 » et un « 0 » sont transmis à deux fréquences différentes.

Une trame, qui correspond à un bloc d'information à transmettre, nécessite 360 bits.

L'inconvénient de cette technologie est que la distance maximale que peut parcourir une trame sur le réseau en restant exploitable n'est que de 300 m. Afin d'augmenter cette distance, chaque module CPL, présent au niveau d'un compteur communicant, qui reçoit une trame la réémet.

1. Un « bit » est le « 0 » ou le « 1 » qui constitue le langage binaire utilisé pour les signaux numériques.

2. a. 2 400 bits · s⁻¹.

b. En une seconde, 2 400 bits sont transmis, soit une durée de transmission d'un bit égale à 1/2 400 = 416 μs. La durée de transmission totale pour une trame est :
160 × 416 μs = 150 ms.

3. a. La faible distance que peut parcourir une trame résulte d'une forte atténuation du signal.

b. $\alpha = \frac{-\ln(10)}{AB} \cdot \log\left(\frac{P_B}{P_A}\right)$.

AB = 300 m.

$P_B/P_A = 0,10$.

Donc $\alpha = \frac{-\ln 10}{300} \times \log(0,1) = 7,7 \times 10^{-3} \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$.

6 1. a. En sortie, le nombre binaire est composé de 8 bits.

b. Avec 8 bits, on peut écrire $R = 2^8 = 256$ nombres.

2. a. La tension est arrondie à la valeur de tension la plus proche qui correspond à une valeur numérique associée à un nombre binaire.

b. Il y a 10 intervalles entre 0 mV et 470 mV, donc le pas de la quantification est $q = 47 \text{ mV}$.

3. a.

00000000
00000001
00000010
00000011
00000100
00000101
00000110
00000111
00001000
00001001
00001010
00001011
00001100

b. C'est le 12^e nombre binaire. Il est associé à l'intervalle de tension [11 q ; 12 q], donc à l'intervalle [517 mV ; 564 mV].

7 1. Un signal numérique est une succession de « 0 » et « 1 » appelés « bits ».

2. a. L'échantillonnage consiste à « découper » le signal électrique analogique à intervalle de temps régulier T_e (en s), appelé période d'échantillonnage.

La fréquence d'échantillonnage f_e (en Hz) définie par la relation $f_e = 1/T_e$, correspond au nombre de points retenus par seconde sur le signal analogique.

b. La période d'échantillonnage T_e doit être suffisamment petite devant la période T du signal analogique à échantillonner. Autrement dit, la fréquence d'échantillonnage f_e doit être suffisamment grande devant la fréquence f du signal analogique.

c. La fréquence d'échantillonnage du signal de niveau de gris est le double de la fréquence du signal analogique le plus important (correspondant au format SECAM).

3. Le débit binaire lors de la numérisation du signal de niveau de gris est :

$$D = R \cdot f_e = 8 \times 13,5 \times 10^6 = 108 \text{ Mbits} \cdot \text{s}^{-1}$$

4. Un pixel est le plus petit élément constitutif de l'image.

5. a. Chaque niveau de gris est codé par un paquet de 8 bits (un octet). Il y a $2^8 = 256$ nombres binaires possibles pour décrire chaque niveau de gris, donc 256 niveaux de gris possibles.

b. Pixel blanc : 11111111 ;

pixel noir : 00000000.

6^e niveau de gris en partant du noir : 00000110.

6. a. La fréquence d'échantillonnage de niveau de gris est de 13,5 MHz. Donc chaque échantillon a une durée de $T = 1/f_{ei} = 1/(13,5 \times 10^6) = 0,0741 \mu s$.

Donc le nombre d'échantillons de niveau de gris est $n_1 = 53,33/0,0741 = 720$ échantillons.

La fréquence d'échantillonnage d'un signal de couleur est de 6,75 MHz, donc deux fois plus faible que pour le niveau de gris.

Donc le nombre d'échantillons pour un signal de couleur est deux fois plus petit : $n_c = 360$ échantillons.

b. Sur une lignes, il a $720 + 360 = 1\ 080$ échantillons utiles.

Comme il y a 575 lignes utiles par images, il y a $575 \times 1\ 080 = 621\ 000$ échantillons utiles par images.

La durée d'une image est de :

$$575 \times 53,33 \times 10^{-6} = 30\ 665 \times 10^{-6} s = 30,7 ms.$$

Dans 1 h de film, on aura donc :

$$3\ 600\ 000/30,7 = 117\ 300 \text{ images formées.}$$

Il faudra donc :

$$621\ 000 \times 117\ 300 = 72,8 \times 10^9 \text{ échantillons.}$$

Chaque échantillon correspondant à un octet (8 bits).

La capacité mémoire nécessaire pour stocker une heure de film est de $72,8 \times 10^9$ octets ou 72,8 Go.

c. Il sera nécessaire de compresser les données.

8 1. Augmenter la capacité de stockage d'un disque optique en concevant le même format revient à enregistrer et lire des inscriptions plus fines et rapprochées.

2. a. Le phénomène physique qui limite la taille de ce qui est gravé sur un CD est le phénomène de diffraction.

b. Pour atténuer ce phénomène, il faut alors diminuer la tache de diffraction du faisceau laser sur le disque, ce qui est rendu possible en diminuant la longueur d'onde du faisceau laser utilisé.

c. Un laser ultraviolet aurait une longueur d'onde encore plus petite que le laser bleu, donc cela permettrait de diminuer encore la tache de diffraction.

3. a. La capacité de stockage est exprimée en bit (MB ou GB) ou octet (Mo ou Go).

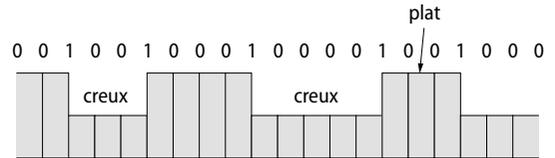
b. Les bits correspondent aux « 0 » et aux « 1 » qui constituent le signal numérique. 1 octet = 8 bits.

9 1. Quand il arrive au niveau de la surface du CD, le faisceau laser est réfléchi.

2. a. Au bord d'un creux, on peut observer des interférences destructives car le faisceau réfléchi par le creux et celui réfléchi par le plat sont en opposition de phase.

b. La conséquence est une intensité nulle du faisceau réfléchi.

3. a.

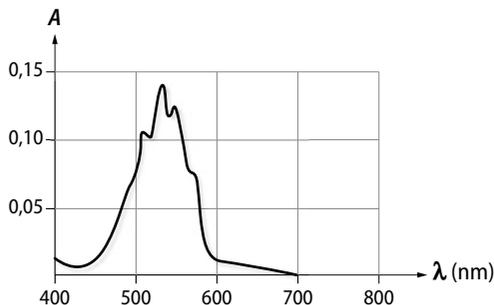


b. La capacité de stockage d'un Blu-ray étant plus importante que pour un CD, la longueur d'onde d'un laser bleu étant plus petite que la longueur d'onde d'un laser rouge.

c. On en déduit que la profondeur d'un creux pour un Blu-ray est moins importante que pour un CD.

Dosage spectrophotométrique

2. On trace le spectre d'absorbance de l'eau de Dakin. On obtient un spectre ayant l'allure suivante :



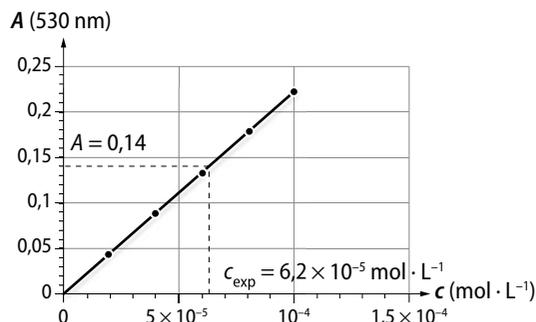
4. On règle le spectrophotomètre sur la longueur d'onde $\lambda_{\max} = 530$ nm environ. On obtient les valeurs suivantes :

Solution	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
Absorbance	0,044	0,088	0,131	0,179	0,221

5. On a $c_1 = (1,0/50,0) \times 1,0 \times 10^{-3} = 2,0 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
 $c_2 = (2,0/50,0) \times 1,0 \times 10^{-3} = 4,0 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
 $c_3 = (3,0/50,0) \times 1,0 \times 10^{-3} = 6,0 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
 $c_4 = (4,0/50,0) \times 1,0 \times 10^{-3} = 8,0 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
 $c_5 = (5,0/50,0) \times 1,0 \times 10^{-3} = 10 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

On obtient le graphique ci-dessous :

Absorbance en fonction de la concentration



6. On mesure $A = 0,140$ pour l'eau de Dakin, ce qui donne, d'après la droite d'étalonnage, une concentration $c_{\text{exp}} = 6,2 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (voir graphe ci-dessus).

7. On a :

$$c = n_{\text{KMnO}_4} / V_{\text{eau de Dakin}} = m_{\text{KMnO}_4} / [M_{\text{KMnO}_4} \cdot V_{\text{eau de Dakin}}]$$

$$= 0,0010 / [(39,1 + 54,9 + 4 \times 16,0) \times 100 \times 10^{-3}]$$

$$= 6,3 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

On calcule l'écart relatif :

$$|c - c_{\text{exp}}| / c = |6,3 \times 10^{-5} - 6,2 \times 10^{-5}| / (6,3 \times 10^{-5}) = 2,0 \%$$

(avec la valeur exacte de c). Les deux valeurs se correspondent.

Sciences et histoire des arts

→ Enseignement spécifique, p. 556

Le programme

Les périodes historiques

– Classe de Terminale : Le xx^e siècle et notre époque

CHAMP SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Thématique « Arts, contraintes, réalisations »

Définition	Pistes d'étude	Repères
Cette thématique permet de souligner les contraintes qui conditionnent la création, la réalisation et la diffusion de l'œuvre d'art.	<p>* <i>L'art et la contrainte</i> : la contrainte comme obstacle à la création (contraintes extérieures : économiques, politiques et sociales, etc.) ; la contrainte comme source de créativité (contraintes que s'impose l'artiste). Les contraintes de diffusion (composition/notation/interprétation musicales ; expositions monumentales, mises en scène, machineries théâtrales, etc.).</p> <p>* <i>L'art et les étapes de la création</i> (palimpsestes, esquisses, essais, brouillons, repentirs, adaptations, variantes, <i>work in progress</i>, etc.).</p> <p>* <i>L'art et l'échec</i> : œuvres restées virtuelles (inachevées, non réalisées, restées à l'état de simulation, de projet, de synopsis, de rêve, etc.) ; l'artiste face à l'échec (inachèvement, sublimation, dépassement, etc.).</p>	<p>Commandes, programmes, contrats.</p> <p>Idee première, genèse, gestation, projet, réalisation.</p> <p>Inachèvement, échec.</p>

Thématique « Arts, sciences et techniques »

Définition	Pistes d'étude	Repères
Cette thématique invite à souligner les relations entre l'art, la science et la technique, et leurs incidences sur la création.	<p>* <i>L'art et les innovations scientifiques et techniques</i> du passé ou actuelles (béton armé, verre, etc.). Les technologies numériques en arts plastiques, cinéma, design, littérature, musique, théâtre. L'objet technique dans l'œuvre d'art (formes et fonctions).</p> <p>* <i>L'art et la démarche scientifique et/ou technique</i> : processus de conception, de réalisation, d'expérimentation. Les concepts scientifiques et l'art (transpositions, analogies, convergences, créations, etc.).</p> <p>* <i>L'art et son discours sur les sciences et techniques</i> (utopie, critique) ; la technique comme motif d'inspiration (éloge du progrès, dénonciation de l'entropie, etc.). Les figures, thèmes et mythes de l'univers technique et scientifique (l'automate, la machine, le robot, l'ingénieur, le savant, etc.)</p>	<p>Invention, expérimentation, réalisation.</p> <p>Concept, connaissance. Mécanisation, reproduction technique ; originalité, « aura », etc.</p> <p>Représentations de la technique et de la science.</p>

Thématique « Arts, informations, communications »

Définition	Pistes d'étude	Repères
Cette thématique invite à replacer l'œuvre d'art dans la circulation des échanges symboliques et à interroger ses rapports avec le monde de l'information.	<p>* <i>L'art, l'information et la communication</i> : concepts (code, émetteur, récepteur, rhétorique, sémiotique, effets, etc.) ; genres patrimoniaux (vitraux médiévaux, gazettes, almanachs, placards, <i>dazibao</i>, réclames, etc.) et contemporains (affiches publicitaires et politiques ; médias écrits ; cinéma documentaire, reportages radiophoniques télévisuels ou cinématographiques, etc.).</p> <p>* <i>L'art et l'utilisation des techniques d'information et de communication</i> (le télégraphe, les écrans, la photocopie, internet, etc.). L'art et ses relations avec les médias.</p> <p>* <i>L'art et ses fonctions</i> : émouvoir, exprimer, plaire, enseigner (<i>dulce/utile ; placere/docere</i>), attester, témoigner, convaincre, informer, galvaniser, tromper, choquer, etc.</p>	<p>Techniques de communication. Médias, journaux, télécommunications.</p> <p>Code, émetteur, récepteur. Messages.</p> <p>Fonctions de l'art.</p>

XX^e SIÈCLE

La bande dessinée s'inspire des sciences

1. La méthode des astrophysiciens utilisée ici est la photographie spectroscopique.
2. Cette méthode permet au professeur de mettre en évidence la présence d'un métal inconnu dans la composition de l'étoile mystérieuse.

Une lucarne sur le monde : la télévision

1. Ces images ont été filmées par une caméra présente sur la Lune. L'information a été transmise de la caméra au module lunaire, puis du module lunaire au vaisseau spatial, du vaisseau spatial à la Terre puis à l'ensemble des foyers disposant d'un poste de télévision.
2. Comme la Terre tourne, les antennes réceptives présentes sur la Terre susceptibles de recevoir l'information provenant de la Lune n'ont pas été les mêmes durant toute la diffusion.

L'image de synthèse fait son cinéma

1. Une image créée par ordinateur est une image numérique (appelée aussi image de synthèse).
2. Une telle image permet de créer des objets ou des environnements qui n'existent dans la réalité.

Des ondes radio à la conquête du monde

1. Une onde radio se propage de l'émetteur radio (généralement une antenne) au récepteur radio.

2. Les premières émissions radio n'ont que très peu d'auditeurs car :
 - les ondes radio sont amorties et ne peuvent donc se propager loin de l'émetteur ;
 - les récepteurs radio ne sont pas encore très répandus.

Il était une fois le disque...

1. Le signal généré par un disque microsillon est analogique et celui généré par un CD est numérique.
2. a. Comme le CD est plus petit que le disque vinyle 33 tours, les chaînes hi-fi peuvent dès lors être plus petites.
b. « hi-fi » signifie « haute fidélité ». La conséquence est que le son produit est le fidèle au son original (hauteur, timbre...).
3. Le record du monde de ventes de disques ne pourra jamais être battu car le XXI^e siècle s'accompagne par le développement d'autres supports pour la musique.

La musique électronique

1. Une musique électronique est produite par un générateur de signaux électriques et non pas un instrument de musique traditionnel.
2. Les ondes sonores sont associées à la musique électronique (comme tout autres types de musique).
3. Un son synthétique reproduit un son produit par un instrument de musique si ses caractéristiques sont les mêmes (hauteur, timbre...).

La chimie inspire les artistes

1. Le centre de la sculpture évoque un atome avec autour de lui des liaisons covalentes comme dans une molécule.

2. La molécule de méthane, tétraédrique, est proche de celle évoquée.

... et réciproquement

1. On peut dire que cette structure est aérienne et harmonieuse.

2. Les fullerènes ont des applications en médecine en tant que transporteur de médicaments ou encore sous forme de nanotubes utilisés en électronique.

Les artistes et les nouveaux matériaux

1. Ces matériaux sont légers, malléables, flexibles et bons marché.

2. Le polyuréthane, le polystyrène et le polychlorure de vinyle sont des polymères.

MESURES ET INCERTITUDES

De l'importance de la mesure

1. a. Dans le document 1, la grandeur mesurée est une longueur : l'écartement des rails.

Dans le document 2, la grandeur mesurée est la vitesse.

b. Dans le premier cas, la mesure assure la sécurité et permet au train de circuler à grande vitesse.

Dans le second cas, la mesure a vocation à légiférer pour qu'une sanction soit prononcée en cas de dépassement de la limitation de vitesse.

2. a. La qualité recherchée pour une mesure est sa précision.

b. Sa limite se situe au niveau de l'existence d'incertitudes.

Erreurs et notions associées

1. a. L'étalon de mesure est par définition une valeur « vraie ».

b. Pour la seconde, la référence est « théorique » car elle ne fait pas référence à un objet mais à une fréquence de transition identifiée en mécanique quantique (voir Partie 3, séquence 6 « Temps et relativité restreinte »).

2. a. Il est physiquement impossible d'accéder à une valeur « vraie » car la mesure est toujours entachée d'une source d'erreur.

b. Les sources d'erreurs systématiques : un appareil de mesure mal réglé, un objet dont la grandeur à mesurer est difficilement accessible.

Les sources d'erreurs aléatoires ou fortuites : une erreur ponctuelle de mesure due à l'expérimentateur

Incertitudes et notions associées

1. a. L'incertitude d'une mesure est l'intervalle des valeurs possibles dans laquelle se trouve la valeur vraie avec une très forte probabilité.

b. Le signe « \pm » écrit devant la valeur d'une incertitude signifie que la valeur de l'incertitude peut s'ajouter ou se retrancher à la valeur de la mesure.

2. a. Si une tension affichée par un voltmètre numérique fluctue entre 4,47 V et 5,35 V :

– la valeur accordée à la mesure est la moyenne entre les deux valeurs extrémales mesurées donc 4,91 V ;

– l'incertitude correspond à la moitié de l'écart qui existe entre les deux valeurs extrémales donc $\pm 0,44$ V.

b. Lorsqu'on utilise une règle graduée, tous les millimètres, l'incertitude sur la mesure qu'on retiendra correspond à la moitié de la plus petite division donc la moitié d'un millimètre : $\pm 0,5$ mm.

3. a. Dans le cas d'une étude statistique, la connaissance de l'écart-type permet de déduire par une formule donnée l'incertitude de la mesure.

b. Ce nombre représente la dispersion des mesures autour de leur valeur moyenne.

Expression et acceptabilité du résultat

SITUATION 1

a. Résultat de la mesure : $105 \pm 5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

b. Précision de la mesure : 4,8 %.

c. Écriture scientifique : $1,05 \times 10^2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

d. L'incertitude est donnée par la moitié de la plus petite division, donc par la moitié de $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ donc $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$: le dernier chiffre significatif est donc le kilomètre par heure.

SITUATION 2

a. Résultat de la mesure : $100,02 \pm 0,01 \text{ g}$.

b. Précision de la mesure : 0,001 %.

c. Écriture scientifique : $1,0002 \times 10^2 \text{ g}$.

d. L'incertitude est donc égale à la plus petite division, soit $\pm 0,01 \text{ g}$: le dernier chiffre significatif est donc le centième de gramme.

SITUATION 3

a. Résultat de la mesure : $22,5 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

b. Précision de la mesure : 2,2 %.

c. Écriture scientifique : $2,25 \times 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

d. L'incertitude est donnée par la moitié de la plus petite division, donc par la moitié de $1 \text{ }^\circ\text{C}$ donc $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$: le dernier chiffre significatif est donc le dixième de degré Celsius.

Enseignement de spécialité

Eau et environnement

Le programme

THÈME 1 : L'eau

Domaines d'étude	Mots-clés
- Eau et environnement.	- Mers, océans ; climat ; traceurs chimiques. - Érosion ; dissolution ; concrétion. - Surveillance et lutte physico-chimique contre les pollutions ; pluies acides.

Les liens avec l'enseignement spécifique

- Dosage spectrophotométrique.
- Dosage par titrage direct.
- Cinétique ; catalyse.
- pH ; réactions acido-basiques ; pK_a ; acide fort ; solution tampon.

Évaluation diagnostique

p. 8

SITUATION 1

La prolifération des algues dans les milieux aquatiques n'est pas un signe de bonne santé du milieu aquatique. Ce phénomène, appelée eutrophisation, est dû à un apport excessif en substances nutritives, notamment en azote et phosphore. Les conséquences sont l'asphyxie du milieu aquatique (mort des animaux aquatiques), et peu à peu la transformation des espaces peu profonds en marais, puis en prairies voire en forêts.

L'**activité 1** permet de doser le phosphore présent sous la forme d'ions phosphates PO_4^{3-} (aq) dans une eau naturelle.

SITUATION 2

Les roches aux formes étonnantes de la grotte de Clamouse sont des concrétions.

L'eau érode et dissout lentement les roches en ruisselant, elle se charge en ions notamment calcium et magnésium. Dans certaines circonstances, ces ions réagissent avec les ions carbonates de l'eau pour former des précipités : ce sont les concrétions.

L'**activité 4** permet de déterminer la dureté d'une eau, grandeur qui caractérise la concentration en ions cal-

cium et magnésium et donc sa capacité à former des concrétions.

SITUATION 3

L'eau, de par sa composition isotopique et les espèces dissoutes, contient un grand nombre d'informations. L'**activité 5** propose d'élaborer une méthode de détermination de la salinité, dont les variations sont en partie responsables de courants océaniques participant à la régulation du climat.

L'**activité 6** permet de comprendre comment les climatologues utilisent la glace pour établir un relevé des températures du passé.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

Dosage des ions phosphates

p. 10

1. On prélève 5,0 mL de solution S avec une pipette graduée, que l'on verse dans une fiole jaugée de 25 mL. On prélève ensuite 4,0 mL de réactif R avec une pipette graduée, que l'on verse dans la fiole jaugée de 25 mL. On complète jusqu'à environ la moitié la fiole jaugée avec de l'eau distillée. On homogénéise, puis on complète avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. La solution S_1 est prête.

$$2. C_1 = C \cdot V_i / V_{\text{total}}$$

$$\text{Donc } C_0 = \frac{3,2 \times 10^{-5} \times 0}{25} = 0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1};$$

$$C_1 = \frac{3,2 \times 10^{-5} \times 5}{25} = 6,4 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1};$$

$$C_2 = \frac{3,2 \times 10^{-5} \times 10}{25} = 1,3 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1};$$

$$C_3 = \frac{3,2 \times 10^{-5} \times 15}{25} = 1,9 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1};$$

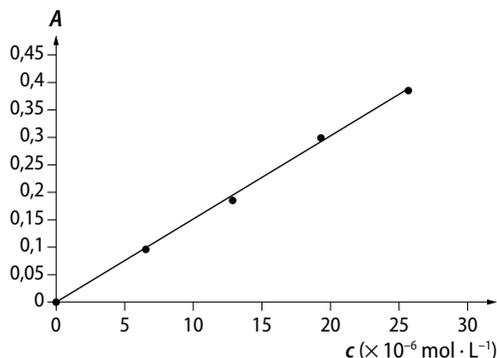
$$C_4 = \frac{3,2 \times 10^{-5} \times 20}{25} = 2,6 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

3. La longueur d'onde doit être au maximum d'absorption, soit 720 nm car la précision du dosage y est plus grande.

$$A_{\text{eau}} = 0,242.$$

Solution	0	1	2	3	4
Absorbance	0,000	0,098	0,187	0,301	0,389
Concentration (mol · L ⁻¹)	0	6,4 × 10 ⁻⁶	1,3 × 10 ⁻⁵	1,9 × 10 ⁻⁵	2,6 × 10 ⁻⁵

4. Graphique représentant l'absorbance A en fonction de la concentration en ions phosphates :



On obtient une droite passant par l'origine. On peut donc vérifier la loi de Beer-Lambert car l'absorbance est proportionnelle à la concentration en ions phosphate.

5. On lit graphiquement la concentration molaire en ions phosphate de la solution S_{eau} :

$$C_{\text{eau}} \approx 1,6 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

$$6. [\text{PO}_4^{3-}] = \frac{C_{\text{eau}} \cdot V_{\text{eau}}}{V_{\text{Seau}}} = \frac{1,6 \times 10^{-5} \times 20}{25} = 1,3 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

$$7. C_m(\text{PO}_4^{3-}) = [\text{PO}_4^{3-}] \cdot (M_p + 4 M_O) = 1,3 \times 10^{-5} \times (31,0 + 4 \times 16,0) = 1,2 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}.$$

8. L'eau analysée est de qualité passable en ce qui concerne les ions phosphate.

ACTIVITÉ 2

L'endosulfane

p. 12

1. a. La molécule d'endosulfane est un pesticide utilisé dans la culture du coton, du café, du riz, du thé, du soja et de légumes.

b. Non, il est interdit en France comme dans les autres pays de l'Union européenne.

c. Son utilisation peut provoquer des troubles endocriniens sur les animaux et les êtres humains avec des conséquences sur leur reproduction et leur développement (malformations par exemple).

2. a. L'endosulfane est un organochloré car cette molécule contient des atomes de carbone et de chlore.

b. L' α -endosulfane et le β -endosulfane sont des isomères, et plus particulièrement des stéréoisomères car ils ont la même formule brute $\text{C}_9\text{H}_6\text{Cl}_6\text{O}_3\text{S}$ mais ils diffèrent par l'organisation spatiale des atomes.

3. Dans l'eau naturelle :

a. la dégradation sous lampe polychromatique de l' α -endosulfane est plus lente que celle du β -endosulfane ;

b. α -endosulfane : $t_{1/2} \approx 19 \text{ h}$;

β -endosulfane : $t_{1/2} \approx 13 \text{ h}$.

4. La dégradation des endosulfanes α et β est plus rapide dans l'eau naturelle que dans l'eau déionisée. Des espèces chimiques présentes dans l'eau naturelle accélèrent donc la dégradation des endosulfanes α et β .

5. a. La dégradation de l' α -endosulfane et du β -endosulfane est plus lente sous irradiation solaire que sous la lampe UV.

b. On peut penser que la puissance lumineuse fournie par le soleil est moins grande que celle fournie par la lampe.

c. L'endosulfane est un polluant organique persistant car sa dégradation est très lente dans l'eau dans les conditions naturelles.

6. a. La présence du système $\text{Fe}^{3+}(\text{aq})/\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq})$ a pour effet de diminuer le temps de demi-réaction.

b. Le système $\text{Fe}^{3+}(\text{aq})/\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq})$ est un catalyseur de cette réaction. Il s'agit d'une catalyse homogène car le catalyseur est en solution aqueuse.

7. Les eaux de rinçage sont traitées de la manière suivante : on introduit le catalyseur $\text{Fe}^{3+}(\text{aq})/\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq})$ et on expose la solution à une lampe UV. La dégradation est ainsi accélérée.

8. La cinétique de dégradation de l'endosulfane dépend de la puissance de la source d'UV utilisée et de la présence ou non du catalyseur $\text{Fe}^{3+}(\text{aq})/\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq})$.

9. L'endosulfane est désormais sur la liste des polluants organiques persistants et devrait être interdit dès 2012 dans le monde.

ACTIVITÉ 3

Les pluies acides

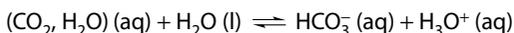
p. 14

1. a. Le terme « pluie acide » désigne toute précipitation anormalement acide.

b. – Une pluie dont le pH est 5,6 peut être qualifiée d'acide au sens chimique du terme car $\text{pH} < 7,0$.

– Une pluie dont le pH est 5,6 n'est pas qualifiée d'acide en terme environnemental car le pH naturel d'une pluie est normalement autour de 5,6.

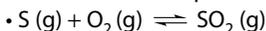
2. La légère acidité d'une eau de pluie est due à la présence de dioxyde de carbone dans l'air. L'équation de dissociation de l'acide est :



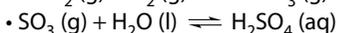
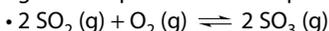
3. Les principaux gaz responsables de l'acidité importante de certaines pluies sont le dioxyde de soufre et les oxydes d'azote.

4. a. Équations de formation :

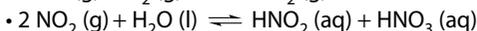
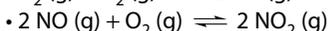
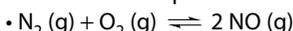
– de l'acide sulfurique :



• $(\text{SO}_2 (\text{g}) + \text{H}_2\text{O} (\text{l}) \rightleftharpoons \text{H}_2\text{SO}_3 (\text{aq})$: l'acide sulfureux est également présent dans les pluies acides.)



– de l'acide nitrique :



b. L'acide sulfurique et l'acide nitrique sont des acides forts, c'est-à-dire qu'ils se dissocient totalement dans l'eau.

5. a. L'acide chlorhydrique est un acide fort, donc :

$$C = 10^{-\text{pH}} = 10^{-1,5} = 3,2 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

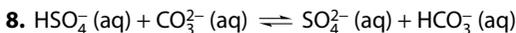
b. Pour manipuler une telle solution, on doit porter un vêtement de protection (blouse), des gants et des lunettes de protection.

6. $\text{pH} = -\log[\text{H}_3\text{O}^+] = -\log(1,6 \times 10^{-5}) = 4,8$.

Les espèces aquatiques qui survivraient sont donc les perches et les grenouilles.

7. a. « Pouvoir tampon des eaux » signifie que le pH de ces eaux ne varie pratiquement pas lors de l'ajout d'une quantité modérée d'acide ou de base et lors d'une dilution modérée.

b. Les ions responsables du pouvoir tampon de ces eaux sont les ions carbonate et hydrogencarbonate.



9. L'épandage de chaux vive permet de diminuer l'acidité des sols grâce aux ions HO^- . En effet, un pH trop bas entraîne la disparition de certaines espèces, la présence de sels d'aluminium perturbant la photosynthèse des végétaux...

10. Le dioxyde de soufre et les oxydes d'azote sont des polluants qui, une fois émis dans l'atmosphère, forment respectivement de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique. Ces espèces acides dissoutes dans l'eau rendent les pluies acides.

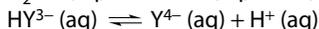
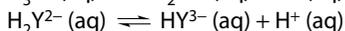
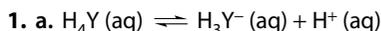
11. Les ions carbonate et hydrogencarbonate, présents naturellement dans l'eau, limitent les variations de pH (solution tampon de pH). Pour limiter l'impact

des pluies acides déjà tombées, on peut ajouter une espèce chimique basique comme la chaux.

ACTIVITÉ 4

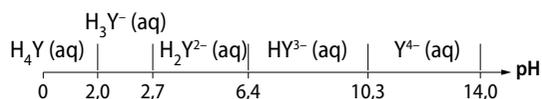
Dureté d'une eau

p. 16



b. L'EDTA est un tétra-acide car il peut libérer 4 protons.

2. a.



b. Les formes prédominantes de l'EDTA à $\text{pH} \approx 10,0$ sont $\text{HY}^{3-} (\text{aq})$ et $\text{Y}^{4-} (\text{aq})$.

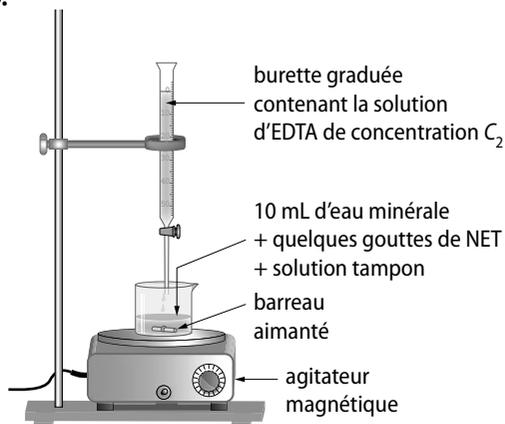
c. On travaille en milieu tamponné car on ajoute un acide, l'EDTA, et le pH doit rester autour de 10.

3. Avant l'équivalence, le NET est complexé avec les ions $\text{Mg}^{2+} (\text{aq})$, la solution est donc rouge-rosé.

À l'équivalence, les derniers ions $\text{Mg}^{2+} (\text{aq})$ réagissent avec l'EDTA ajouté, le NET devient donc libre et donne une couleur bleue à la solution.

Après l'équivalence, il n'y a plus d'ions $\text{Mg}^{2+} (\text{aq})$, le NET est libre, la solution est donc bleue.

4.



5. $V_{\text{éq}} = 14,5 \text{ mL}$.

6. a. À l'équivalence, la quantité de matière d'EDTA introduite est égale aux quantités de matière de calcium et de magnésium initiales, donc $C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_{\text{éq}}$

$$\text{b. } C_1 = \frac{C_2 \cdot V_{\text{éq}}}{V_1} = \frac{1,0 \times 10^{-2} \times 14,5}{10,0} = 1,45 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

c. $\text{TH} = C_1 \times 10^4 = 1,45 \times 10^{-2} \times 10^4 = 145 \text{ }^\circ\text{TH}$.

7. L'eau minérale dosée est donc très dure.

8. a. À partir de l'étiquette de l'eau minérale dosée :

$$C_{1\text{étiquette}} = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]$$

$$C_{\text{étiquette}} = \frac{C_m(\text{Ca})}{M(\text{Ca})} + \frac{C_m(\text{Mg})}{M(\text{Mg})}$$

$$\begin{aligned} \text{donc TH} &= 10^4 \times \left(\frac{C_m(\text{Ca})}{M(\text{Ca})} + \frac{C_m(\text{Mg})}{M(\text{Mg})} \right) \\ &= 10^4 \times \left(\frac{C_m(\text{Ca})}{40,1} + \frac{C_m(\text{Mg})}{24,3} \right) \\ &= 10^4 \times \left(\frac{0,468}{40,1} + \frac{0,0745}{24,3} \right) = 147 \text{ }^\circ\text{TH.} \end{aligned}$$

b. Les résultats sont proches.

9. Les cations impliqués dans la formation des concrétions présentes dans les grottes sont les ions calcium (II) Ca^{2+} et magnésium (II) Mg^{2+} .

10. Plus une eau est dure, plus elle contient des ions calcium (II) Ca^{2+} et magnésium (II) Mg^{2+} , et plus cette eau pourra former des concrétions. Déterminer la dureté d'une eau permet donc d'évaluer la capacité d'une eau à former des concrétions.

ACTIVITÉ 5

La salinité d'une eau

p. 18

1. Les proportions relatives des espèces dissoutes (fig. 2) restant quasiment constantes quelque soit la salinité, cette dernière est proportionnelle à la chlorinité. Le calcul du coefficient de proportionnalité pour l'eau de la figure 2 permet de déterminer la salinité de n'importe quelle eau à partir de sa chlorinité.

2. Les ions chlorures sont généralement dosés par les ions argent Ag^+ (aq) en présence de chromate de potassium (indicateur de fin réaction). Cette méthode est appelée méthode de Mohr.

3. a. L'élément chlore Cl et l'élément brome Br appartiennent à la famille des halogènes.

b. On peut dire que leur réactivité est très proche.

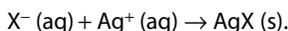
4. On dose les ions chlorure Cl^- (aq) et bromure Br^- (aq) de l'eau de mer (de concentration c_1) par les ions argent Ag^+ (aq) (solution de concentration c_2 dans la burette). Les ions dichromate CrO_4^{2-} (aq) ajoutés permettent de repérer l'équivalence en formant un précipité rouge Ag_2CrO_4 (s).

5. a. L'unité de la chlorinité Ch est le $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

b. Non, il faut aussi connaître la densité de l'eau.

6. On verse un volume donné (par exemple 100 mL) dans une éprouvette graduée sur une balance préalablement tarée. La masse indiquée divisée par le volume donne la masse volumique de l'eau.

7. Soient les ions chlorure et bromure notés X^- :



À l'équivalence, la quantité de matière d'ions Ag^+ introduite est égale à la quantité de matière d'ions X^- initiale donc :

$$c_2 \cdot V_{\text{éq}} = c_1 \cdot V_1.$$

8. a. $c_1 = \frac{c_2 \cdot V_{\text{éq}}}{V_1}$, d'où :

$$c_1 = \frac{5,0 \times 10^{-1} \times 11,2}{10} = 5,60 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

b. $c_{\text{m1}} = c_1 \cdot M_{\text{Cl}} = 5,60 \times 10^{-1} \times 35,5 = 19,88 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.

$$\rho_{\text{eau de mer}} = \frac{m_{\text{eau}}}{V_{\text{eau}}} = \frac{102,5}{0,100} = 1\,025 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}.$$

$$1 \text{ kg d'eau contient } \frac{c_{\text{m1}}}{\rho_{\text{eau de mer}}} = \frac{19,88}{1,025} = 19,39 \text{ g d'ions}$$

chlorure par kg d'eau donc $\text{Ch} = 19,39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

9.

$$\begin{aligned} S &= [(18,9799 + 2,6486 + 0,1397 + 0,0646 + 10,5561 \\ &\quad + 1,2720 + 0,4001 + 0,3800) / (18,9799 + 0,0646)] \times \text{Ch} \\ &\approx 1,81 \text{ Ch.} \end{aligned}$$

10. 1 L d'eau, soit 1,025 kg contient $c_{\text{m1}} = 19,88 \text{ g}$ d'halogénures équivalents chlore.

$$S = 1,81 \text{ Ch} = 1,81 \times 19,39 = 35,1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

11. La méthode par conductimétrie est plus rapide, plus facile à mettre en œuvre notamment sur des bateaux ou dans des balises.

12. Le suivi de la salinité en un lieu donné permet le suivi des courants océaniques régulateurs du climat et donc l'étude d'éventuels changements climatiques.

ACTIVITÉ 6

Les archives du climat

p. 20

1. a. Des noyaux isotopes sont deux noyaux de même numéro atomique Z mais de nombre de nucléons A différent.

b. Leurs propriétés chimiques sont identiques.

2. Dans la glace, les atomes d'oxygène appartiennent à la molécule d'eau.

3. Le rapport isotopique $\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}$ mesuré a la même valeur

que lorsque la glace s'est solidifiée car ces deux isotopes sont stables et ne réagissent pas avec d'autres espèces chimiques.

4. La température de l'air semble reliée à la variation relative $\delta^{18}\text{O}$.

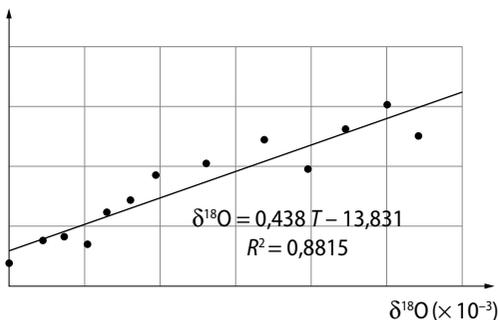
5. Lors du trajet de l'eau vers les pôles, la vapeur d'eau est appauvrie en ^{18}O . Le rapport $\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}$ dans les précipitations formées à partir de cette vapeur diminue donc quand on se rapproche des pôles, d'où le terme de fractionnement isotopique.

6. a. Lorsque la température locale diminue, les précipitations à une latitude donnée sont appauvries en ^{18}O . La neige est appauvrie en ^{18}O , le rapport $\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}$ diminue, donc la variation $\delta^{18}\text{O}$ dans la glace polaire diminue.

b. Lorsque la température locale augmente, la neige est moins appauvrie en ^{18}O , le rapport $\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}$ augmente, donc la variation $\delta^{18}\text{O}$ dans la glace polaire augmente.

7. Pour montrer que la valeur de $\delta^{18}\text{O}$ est liée à la valeur de la température en un lieu donné, on mesure le $\delta^{18}\text{O}$ dans les précipitations en un lieu donné en fonction de la température.

8. $T(^{\circ}\text{C})$



9. La courbe obtenue est une droite d'équation :

$$T = 0,438 \times \delta^{18}\text{O} - 13,831.$$

10. Une augmentation de $\delta^{18}\text{O}$ de $1,0 \times 10^{-3}$ correspond à une élévation de la température de $\frac{1}{0,438} = 2,3^{\circ}\text{C}$.

11. L'équation obtenue précédemment est spécifique à Halley car $\delta^{18}\text{O}$ dépend aussi de la latitude.

12. Les glaces et sédiments constituent des archives du climat car ils contiennent des traceurs témoins du climat à l'époque de leur formation.

13. La composition isotopique en oxygène des glaces et sédiments est directement liée à la température locale au moment de leur formation. Mesurer le rapport isotopique $\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}$ permet de déterminer les températures du passé.

EXERCICES

COMPÉTENCE : Analyser des documents scientifiques

1. Oui, la relation est linéaire pour des concentrations massiques en uranine comprises entre 0,1 et $1\,000 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.

2. Plus le milieu est acide, plus le pH est faible et plus l'intensité de la fluorescence de l'uranine est faible, ce qui la rend difficilement détectable.

3. Le pic de la concentration en uranine à Champ-Pelledieu est détecté 3,4 jours après l'injection à Bois-Barreaux. La distance apparente étant $2\,975 \text{ m}$, la vitesse apparente est $2\,975/3,4 = 875 \text{ m} \cdot \text{jour}^{-1}$ soit environ $36 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$.

2. 1. Oui, les deux premiers graphiques montrent que plus la température de surface du globe augmente, plus le niveau moyen de la mer augmente comme on peut s'y attendre.

2. Oui, ces modèles semblent valables car les observations effectuées correspondent parfaitement aux anomalies de température du globe et des océans prévues par ces modèles.

3. Les prévisions des modèles intégrant les forçages naturels seulement montrent une relative stabilité des températures du globe et des océans, voir même une légère baisse depuis 1950.

4. Le réchauffement climatique observé actuellement est une conséquence des activités anthropiques. En effet, seuls les modèles incluant les forçages anthropiques correspondent aux observations effectuées.

3. 1. a. Les molécules contenant les phosphates après traitement sont $\text{Ca}(\text{PO}_4\text{H})_2 (\text{s})$ et $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 (\text{s})$.

b. Ces molécules sont à l'état solide.

c. On peut donc les séparer par filtration ou décantation.

2. a. $\text{Ca}(\text{OH})_2 (\text{s}) \rightarrow \text{Ca}^{2+} (\text{aq}) + 2 \text{OH}^{-} (\text{aq})$

b. La chaux libère des ions $\text{OH}^{-} (\text{aq})$, c'est donc une base.

c. Lors de l'ajout d'une base dans une solution, le pH augmente.

3. La concentration massique minimale d'une solution aqueuse de chaux pour éliminer à 95 % les phosphates est $175 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

4. Plusieurs problèmes se posent :

– le pH augmente, ce qui peut nuire à la faune et à la flore aquatiques ;

– la séparation des particules formées est difficile en milieu naturel : la filtration est impossible à mettre en œuvre et la décantation implique que de grandes quantités de ces particules solides restent définitivement au fond.

COMPÉTENCE : Pratiquer une démarche expérimentale

4. 1. $m = n \cdot M = c \cdot V \cdot M$

$$= 0,200 \times 50,0 \times 10^{-3} \times 392,1 = 3,92 \text{ g.}$$

2. $n_1 = c_1 \cdot V_1 = 0,200 \times 45,0 \times 10^{-3}$

$$= 9,00 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

3. Le montage utilisé est appelé chauffage à reflux.

4. $(\text{Fe}^{2+} (\text{aq}) \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+} (\text{aq}) + \text{e}^{-}) \quad \times 3$

$(\text{NO}_3^{-} (\text{aq}) + 4 \text{H}^{+} (\text{aq}) + 3 \text{e}^{-} \rightleftharpoons \text{NO} (\text{g}) + 2 \text{H}_2\text{O} (\text{l})) \quad \times 1$

$4 \text{H}^{+} (\text{aq}) + \text{NO}_3^{-} (\text{aq}) + 3 \text{Fe}^{2+} (\text{aq})$

$\rightarrow \text{NO} (\text{g}) + 2 \text{H}_2\text{O} (\text{l}) + 3 \text{Fe}^{3+} (\text{aq}) \quad (1)$

5. $n_2 = c_2 \cdot V_{\text{éq}} = 0,100 \times 10,0 \times 10^{-3}$

$$= 1,00 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

6. À l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stoechiométriques, donc :

$$n_3 = 6 n_2 = 6 \times 1,00 \times 10^{-3} = 6,00 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

7. $n_4 = n_1 - n_3 = 9,00 \times 10^{-3} - 6,00 \times 10^{-3} = 3,00 \times 10^{-3} \text{ mol.}$

8. $n_5 = \frac{n_4}{3} = \frac{3,00 \times 10^{-3}}{3} = 1,00 \times 10^{-3} \text{ mol.}$

9. $m_{\text{nitrate}} = n_5 \cdot M(\text{NO}_3^-) = n_5 \cdot [M(\text{N}) + 3M(\text{O})] = 1,00 \times 10^{-3} \times (14,0 + 3 \times 16,0) = 6,20 \times 10^{-2} \text{ g.}$

10. $p_{\text{nitrate}} = \frac{m_{\text{nitrate}}}{m_{\text{engrais}}} \times 100 = \frac{6,20 \times 10^{-2}}{1,00} \times 100 = 6,20 \text{ \%.}$

5 1. a. $\sigma = \lambda(\text{NH}_4^+) \cdot [\text{NH}_4^+] + \lambda(\text{OCN}^-) \cdot [\text{OCN}^-].$

b. D'après l'équation, $[\text{NH}_4^+] = [\text{OCN}^-]$, donc :

$$\sigma = \{\lambda(\text{NH}_4^+) + \lambda(\text{OCN}^-)\} \cdot [\text{NH}_4^+],$$

d'où $[\text{NH}_4^+] = \frac{\sigma}{\lambda(\text{NH}_4^+) + \lambda(\text{OCN}^-)}.$

Connaissant les conductivités molaires ioniques $\lambda(\text{NH}_4^+)$ et $\lambda(\text{OCN}^-)$, la mesure de la conductivité σ permet de calculer la concentration en ions ammonium $[\text{NH}_4^+]$.

2. a.	$(\text{NH}_2)_2\text{CO}(\text{aq}) \rightarrow \text{NH}_4^+(\text{aq}) + \text{OCN}^-(\text{aq})$		
État initial $x = 0 \text{ mol}$	$c \cdot V$	0	0
En cours avancement x	$c \cdot V - x$	x	x
État final $x = x_f$	$c \cdot V - x_f = 0$	x_f	x_f

b. À tout moment, $[\text{NH}_4^+] = \frac{n(\text{NH}_4^+)}{V} = \frac{x}{V}.$

c. $c \cdot V - x_f = 0$, donc :

$$x_f = c \cdot V = 0,020 \times 100,0 \times 10^{-3} = 2,0 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

d. $x(t = 230 \text{ min}) = 0,00175 < x_f$ donc la réaction n'est pas terminée.

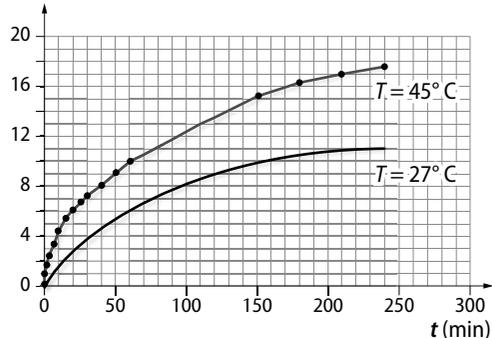
3. Le temps de demi-réaction $t_{1/2}$ est tel que :

$$x(t_{1/2}) = \frac{x_{\text{final}}}{2} = \frac{2,0 \times 10^{-3}}{2} = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

On lit $t_{1/2} = 60 \text{ min.}$

4.

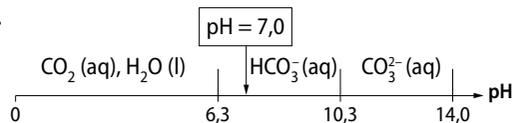
$x (\times 10^{-4} \text{ mol})$



5. Un aquarium doit être bien planté car les végétaux se nourrissent d'ions nitrate et évitent l'accumulation de ces espèces.

6 1. Pour $V_a = 0 \text{ mL}$, on lit $\text{pH} = 7,0$.

2.



Ce sont bien les ions hydrogénocarbonate HCO_3^- (aq) qui prédominent à $\text{pH} = 7,0$.

3. La phénolphthaléine est incolore dans cette eau ($\text{pH} = 7,0$).

4. La phénolphthaléine restera incolore par ajout d'acide chlorhydrique car le pH va diminuer. On ne peut donc pas déterminer un volume équivalent par l'observation.

5. Le titre alcalimétrique TA de cette eau minérale est nul car la concentration en ions carbonates CO_3^{2-} (aq) est trop faible pour être dosée (voir diagramme de prédominance du 2. à $\text{pH} = 7,0$).

6. Les ions hydrogénocarbonate étant prédominant dans cette eau, on considère que la réaction de dosage est $\text{HCO}_3^- (\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+ (\text{aq}) \rightarrow \text{CO}_2 (\text{aq}), \text{H}_2\text{O} (\text{l}) + \text{H}_2\text{O} (\text{l})$

7. $n_a = C_a \cdot V_a = 2,0 \times 10^{-2} \times 14,5 \times 10^{-3} = 2,9 \times 10^{-4} \text{ mol.}$
Pour $V_a = 14,5 \text{ mL}$, on lit $\text{pH} = 4,5$.

Il reste $n'_a = [\text{H}_3\text{O}^+] \cdot (V_1 + V_a) = 10^{-\text{pH}} \cdot (V_1 + V_a) = 10^{-4,5} \times (14,5 + 50,0) \times 10^{-3} = 2,04 \times 10^{-6} \text{ mol.}$

Comparons x pour $V_a = 14,5 \text{ mL}$ et x_{max} .

$$n'_a = n_a - x$$

$$x = n_a - n'_a$$

$$x = 2,8 \times 10^{-4} - 2,04 \times 10^{-6} \approx 2,8 \times 10^{-4} \text{ mol}$$

et

$$0 = n_a - x$$

$$x = n_a = 2,80 \times 10^{-4} \text{ mol}$$

$$x = x_{\text{max}}$$

La réaction est donc totale et peut être utilisée pour le dosage.

8. Le point d'équivalence correspond au point de la courbe $\text{pH} = f(V_a)$ pour le minimum de sa dérivée. On lit $V_{\text{aéq}} = 14,5 \text{ mL}$; $\text{pH}_{\text{éq}} = 4,5$.

9. La zone de virage du vert de bromocrésol contient le pH à l'équivalence, donc on peut l'utiliser comme indicateur coloré pour ce dosage.

10. À l'équivalence :

$$n_{\text{a versés éq}} = n(\text{HCO}_3^-)_{\text{initial}} \rightleftharpoons C_a \cdot V_{\text{aéq}} = C \cdot V_1 \rightleftharpoons C = \frac{C_a \cdot V_{\text{aéq}}}{V_1} = \frac{2,0 \times 10^{-2} \times 14,5 \times 10^{-3}}{50 \times 10^{-3}}$$

$$C = 5,8 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

$$T = C \cdot M(\text{HCO}_3^-) = C \cdot [M(\text{H}) + M(\text{C}) + 3 \cdot M(\text{O})]$$

$$= 5,8 \times 10^{-3} \times [1,0 + 12,0 + 3 \times 16,0] = 3,5 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}.$$

11. On a dosé 50 mL et obtenu $V_{\text{aéq}} = 14,5$ mL. Si l'on avait dosé 100 mL d'eau, on aurait eu $V_{\text{aéq}} = 29,0$ mL donc d'après la définition donnée, le TAC de cette eau minérale est 29,0.

COMPÉTENCE : Résoudre des problèmes scientifiques

7 1. Non, le fer dissous dans l'EUC ne provient pas d'une réduction bactérienne car le $\delta^{56}\text{Fe}$ est largement positif dans l'EUC.

2. a. La concentration en fer entre la station côtière et la station en « océan ouvert » diminue.

b. La composition isotopique du fer dans l'EUC au niveau des deux stations est quasiment identique.

c. On en déduit que le fractionnement isotopique du fer dans ce courant est très faible, et ce malgré la grande distance parcourue et la forte soustraction en fer de ces eaux dans l'EUC (forte diminution de la concentration en fer : voir 2.a).

3. Le traceur $\delta^{56}\text{Fe}$, dont les valeurs sont reliées à l'origine du fer (réduction bactérienne ou non), ne varie quasiment pas, même en cas de diminution de la concentration et sur de grandes distances (fractionnement isotopique très faible).

8 1. Si le pH diminue de 0,4 unité, sa valeur passe d'une valeur x à $x - 0,4$.

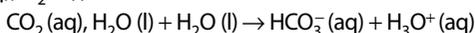
La concentration en ions oxonium passe de

$$[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{initial}} = 10^{-x} \text{ à } [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{final}} = 10^{-(x-0,4)} \text{ donc :}$$

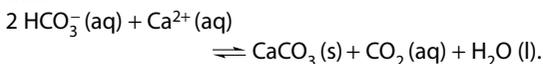
$$\frac{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{final}}}{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{initial}}} = 10^{-x}/10^{-(x-0,4)} = 10^{0,4} = 2,5 \approx 3.$$

L'acidité est donc multipliée par 3.

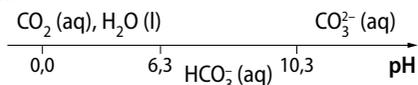
2. Il s'agit de l'équation de dissociation de l'acide CO_2 (aq), H_2O (l) :



3. Les coraux et les animaux calcificateurs forment une partie de leur corps en calcaire CaCO_3 (s) selon l'équation :



Ils sont menacés par l'acidification des océans car plus le pH est bas, et moins l'ion hydrogénocarbonate est présent :



4. Le principal avantage de la méthode d'enfouissement du dioxyde de carbone dans les eaux profondes serait de stocker ce gaz à effet de serre qui contribue au réchauffement climatique ailleurs que dans l'atmosphère.

Les inconvénients de cette méthode sont liés à la dissolution possible du CO_2 dans l'eau, ce qui aurait deux conséquences :

- l'acidification des océans, qui menace les coraux et autres animaux calcificateurs ;
- l'emprisonnement du dioxyde de carbone ne serait donc que temporaire.

ÉVALUATION DES COMPÉTENCES EXPÉRIMENTALES

Dosage des ions nitrate dans une eau naturelle

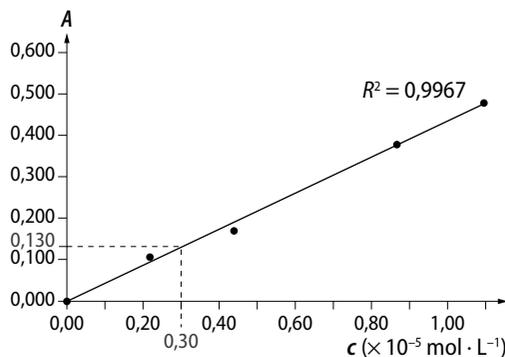
p. 27

1. On prélève 5,0 mL de solution S avec une pipette jaugée de 5,0 mL que l'on verse dans une fiole jaugée de 50 mL. On verse ensuite dans cette fiole jaugée 1,0 mL de réactif R_1 puis 1,0 mL de réactif R_2 à l'aide de deux burettes graduées. On remplit jusqu'à moitié d'eau distillée la fiole jaugée puis on homogénéise. On complète ensuite jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée. La solution S_1 est prête.

5.

Solution	C_f ($\times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	A
S_0	0,00	0,000
S_1	0,22	0,106
S_2	0,44	0,171
S_3	0,87	0,377
S_4	1,10	0,480

6. a. et b. Graphe traduisant l'évolution de l'absorbance A en fonction de la concentration C_f en ions nitrite :



7. On mesure l'absorbance de la solution S_{eau} : $A = 0,130$.

8. a. On lit graphiquement pour $A = 0,130$:

$$C_{\text{NO}_2} = 0,30 \times 10^{-5} = 3,0 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

b. $C_{\text{NO}_3} = \frac{48}{50} \times C_{\text{NO}_2} = \frac{48}{50} \times 3,0 \times 10^{-6} = 2,9 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$

Eau et ressources

Le programme

THÈME 1 : L'eau

Domaines d'étude	Mots-clés
- Eau et ressources.	- Production d'eau potable ; traitement des eaux. - Ressources minérales et organiques dans les océans ; hydrates de gaz.

Les liens avec l'enseignement spécifique

- Dosage par titrage direct, utilisation d'un indicateur de fin de réaction.
- Interactions entre la science et la société.
- pH ; réactions acido-basiques ; pK_a ; domaine de prédominance.

Évaluation diagnostique p. 30

SITUATION 1

Les réserves d'eau potable à la surface de la Terre sont de plus en plus polluées, surexploitées et asséchées, une grave pénurie d'eau est annoncée alors que l'eau est une ressource naturelle, renouvelable et inépuisable. Cette pénurie touche déjà tous les continents : 450 millions de personnes dans 29 pays sont confrontées à des problèmes de pénurie d'eau, ce nombre pourrait s'élever à 2,5 milliards en 2050 (source UNESCO).

L'**activité 1** montre que la quantité d'eau douce présente sur Terre serait en théorie suffisante pour la population en 2050 mais qu'elle ne permettra pas d'assurer l'approvisionnement en eau potable à toute la population mondiale.

L'**activité 3** permet de découvrir le principe très simplifié d'un des nouveaux procédés de dessalement.

L'**activité 6** décrit le principe de fonctionnement d'une usine de potabilisation.

SITUATION 2

L'eau subit parfois des traitements avant d'être utilisée, par exemple, elle peut être déminéralisée ou adoucie. Une résine échangeuse d'ions permet de réaliser ces traitements en échangeant au contact de la solution,

les ions de cette solution par d'autres ions de même signe contenus dans la résine.

L'**activité 4** permet de réaliser une déminéralisation partielle quantitative d'une eau minérale à l'aide d'une résine échangeuse de cations.

SITUATION 3

La croissance démographique mondiale explose, les besoins augmentent. Cependant, les ressources énergétiques et minérales commencent à faire défaut à la surface de la Terre. Il est donc nécessaire de découvrir d'autres ressources naturelles exploitables. Pour cela, l'Homme se tourne donc vers l'océan qui contient de nombreuses ressources minérales et organiques (pétrole, gaz, hydrates de gaz, nodules polymétalliques, hydrogène...), mais leurs exploitations sont parfois difficiles voire impossible à l'heure actuelle. De très nombreux projets de recherche sont en cours pour essayer de mettre au point l'exploitation de ces nombreuses richesses.

L'**activité 2** présente dans un premier temps, les hydrates de gaz (plus particulièrement de méthane) et dans un second temps, elle essaie de répondre à la question « Pourquoi les hydrates de gaz pourraient représenter un danger pour le climat ? »

L'**activité 5** présente quelques projets de recherche d'exploitation de ressources au fond de l'océan (pétroles, métaux, médicaments, dihydrogène...).

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

Le monde va-t-il manquer d'eau ? p. 32

1. a. D'après le document 3 « le cycle hydrologique de la planète sur un an », on voit que l'eau s'évapore, se

condense et précipite en permanence, donc l'eau circule en un mouvement perpétuel entre les terres émergées, les océans et l'atmosphère.

– Somme des **volumes des eaux qui se transforment en vapeur**, on obtient un volume de $577\,000\text{ km}^3$: $9\,000\text{ km}^3 + 502\,800\text{ km}^3$ (évaporation) + $65\,200\text{ km}^3$ (évapotranspiration) = $577\,000\text{ km}^3$.

– Somme des **volumes des eaux qui précipitent** : $9\,000 + 110\,000 + 458\,000 = 577\,000\text{ km}^3$.

Les deux volumes sont identiques.

On constate que l'eau ne disparaît jamais, elle se régénère. La quantité d'eau reste constante.

Le volume d'eau total annuellement recyclé est de $577\,000\text{ km}^3$.

b. Si on prend comme valeur pour le rayon de la Terre $R_T = 6,36 \times 10^3\text{ km}$ et $h = 3,80\text{ km}$.

Soit S la surface occupée par les océans :

$$S = 0,71 \times 4\pi R^2 = 4\pi(6,36 \times 10^3)^2 = 3,61 \times 10^8\text{ km}^2.$$

Le volume occupé par les océans est :

$$V = S \cdot h = 1,37 \times 10^9\text{ km}^3.$$

Ce volume représente environ 97,5 % des stocks d'eau de la planète (cf. Doc. 1).

$$V(\text{total du stock d'eau}) = (100 \times 1,37 \times 10^9) / 97,5 = 1,40 \times 10^9\text{ km}^3.$$

L'ordre de grandeur est donc 10^9 km^3 .

c. Le volume du stock hydrique mondial est de : $1,4 \times 10^9\text{ km}^3$.

Le volume total annuellement recyclé est de $577\,000\text{ km}^3$. $P = 577\,000 \times 100 / 1,4 \times 10^9 = 0,041\%$.

La masse d'eau annuellement recyclée semble énorme, et pourtant cela ne représente qu'une très faible proportion du stock hydrique.

2. a. On peut qualifier l'eau comme une ressource naturelle et renouvelable. Comment pourrait-on manquer d'eau, une ressource renouvelable !

b. Le stock de pétrole (l'or noir, qui a mis des millions d'années à se former) diminue au cours des années, alors que l'eau est une ressource renouvelable, elle ne disparaît pas. Sur Terre, l'eau circule et se transforme sans cesse, c'est le cycle naturel de l'eau. La quantité d'eau sur Terre est quasiment constante.

3. D'après les prévisions, en 2050 la population devrait être de $9,2 \times 10^9$ habitants (Doc. 4).

$V_{\text{thé}} = (\text{volume d'eau douce renouvelable/an}) / \text{nombre d'habitants}$

$$= 44 \times 10^3\text{ km}^3 / 9,2 \times 10^9 = 4,8 \times 10^{-6}\text{ km}^3/\text{hab/an}$$

$$= 4,8 \times 10^3\text{ m}^3/\text{hab/an}.$$

4. D'après la légende de la carte (Doc. 2), lorsqu'un pays possède moins de $1\,700\text{ m}^3/\text{hab/an}$ d'eau douce disponible, on dit qu'il est stress hydrique, c'est-à-dire situation critique avant la pénurie (situation alarmante). Le volume d'eau douce disponible par personne et par an, quelle que soit leur utilisation, sont des indicateurs

de situation de confort, de vulnérabilité, de stress ou de carence absolue. Lorsqu'un pays dispose annuellement de moins de $1\,700\text{ m}^3/\text{hab}$, on dit qu'il souffre de stress hydrique. Par contre, au-dessus de $2\,500\text{ m}^3/\text{hab}$ il n'y a aucun problème.

5. D'après le calcul précédent, en 2050 le volume disponible par habitant et par an serait de $4,8 \times 10^3\text{ m}^3/\text{hab/an}$ donc supérieur à $2\,500\text{ m}^3/\text{hab/an}$. En théorie, il y a assez d'eau douce.

6. L'eau douce disponible par habitant varie fortement selon les pays. L'eau est inégalement répartie à la surface de la Terre. Donc en théorie, il y aurait assez d'eau pour toute la population, mais certains pays n'auront pas la quantité suffisante. (*Remarque* : 9 pays se partagent 60 % des réserves d'eaux douces : Brésil, Russie, États-Unis, Canada, Chine, Indonésie, Inde, Colombie, Pérou).

7. a. L'eau ne disparaît pas à la surface de la Terre.

L'eau potable serait en quantité suffisante « en théorie » aujourd'hui pour satisfaire tous les besoins mais :

– Le besoin en eau est de plus en plus grand car population augmente (6,5 milliards aujourd'hui, 8 en 2025 et 9,2 environ en 2050) tandis que l'eau disponible par habitant diminue. La quantité moyenne d'eau douce renouvelable disponible par personne et par an diminue puisque le volume d'eau douce renouvelable par an est constant $44 \times 10^3\text{ km}^3$ et que la population augmente.

– La consommation individuelle augmente ; les besoins en eau potable sont de plus en plus grands (de plus en plus d'hommes à la surface de la Terre) sans parler de l'eau « cachée » ou de l'eau « virtuelle » nécessaire, par exemple : 3 400 litres d'eau en moyenne pour 1 kg de riz produit (Doc. 7).

– De plus en plus de surfaces agricoles sont irriguées, car pour nourrir la planète la production agricole augmentera (Doc. 4).

– Nous sommes de plus en plus nombreux, donc l'eau est de plus en plus polluée (Doc. 5).

– Le gaspillage de cette eau augmente (Doc. 4).

– L'eau est inégalement répartie à la surface de la Terre, et cette inégalité pourrait s'accroître avec les changements climatiques et l'évolution climatique (Doc. 2).

– La régénération des eaux souterraines se fait de plus en plus difficilement : urbanisation qui augmente avec la population, imperméabilisation des surfaces.

b. Pour préserver le stock d'eau douce, il faut éviter de le polluer (Doc. 5), donc il faut diminuer les rejets et surtout il faut épurer les eaux usées (c'est-à-dire les nettoyer) avant de les rejeter dans la nature (Doc. 5).

8. a. On produit de l'eau potable en produisant de l'eau douce par dessalement de l'eau de mer. La méthode consiste à séparer l'eau des sels dissous (Doc. 6).

b. Deux méthodes sont principalement employées pour dessaler l'eau.

– **La distillation** consiste à évaporer l'eau de mer, soit en utilisant la chaleur des rayons solaires, soit en la chauffant dans une chaudière. Seules les particules d'eau s'échappent, laissant en dépôt les sels et toutes les autres substances contenues dans l'eau de mer. Il suffit alors de condenser la vapeur d'eau ainsi obtenue pour obtenir une eau douce consommable.

Inconvénients : grosse consommatrice d'énergie, le goût de l'eau est en général peu satisfaisant, à cause du passage dans la chaudière et une reminéralisation de l'eau est obligatoire.

– La deuxième méthode est celle de **l'osmose inverse**.

Avantage : elle tend à se développer car elle présente un fort intérêt en terme de coût d'investissement, de consommation d'énergie et de qualité de l'eau produite. L'osmose inverse nécessite de traiter au préalable l'eau de mer en la filtrant et en la désinfectant afin de la débarrasser des éléments en suspension et des micro-organismes qu'elle contient. Le procédé consiste ensuite à appliquer à cette eau salée une pression suffisante pour la faire passer à travers une membrane semi-perméable : seules les molécules d'eau traversent la membrane, fournissant ainsi une eau douce potable.

Inconvénients pour les deux méthodes :

– les deux méthodes engendrent des rejets d'eau de forte concentration en sel. Ces rejets se font dans le milieu marin environnant, et ces rejets ne sont pas toujours sans risque ;

– des rejets de CO_2 suivant la source énergétique utilisée (pétrole, charbon).

Avantages pour les deux méthodes :

– permet d'obtenir de l'eau douce dans des régions en manque.

ACTIVITÉ 2

La « glace qui brûle »

p. 34

1. La formule du méthane est CH_4 . Sa représentation de Lewis est la suivante :



2. La température et la pression (cf. graphique).

3. D'après le graphique, pour une température de 4°C , les hydrates stables commencent à apparaître à une profondeur d'environ 450 m.

La pression hydrostatique augmente avec la profondeur ; dans le cas de l'eau, elle augmente environ de 1 bar tous les 10 m.

Dans le SI, la pression s'exprime en pascal (Pa).

$1 \text{ atm} = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$, soit $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ (avec 1 cs)

donc $1 \text{ bar} = 1 \times 10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ atm}$.

Donc la pression absolue à 450 m sera de :

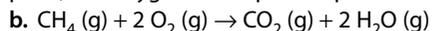
$$P_{\text{absolue}} = P_{\text{hydrostatique}} + P_{\text{atm}} = 45 + 1 = 46 \text{ bar} = 46 \times 10^5 \text{ Pa}.$$

4. À 800 m de profondeur, les hydrates sont stables à 10°C (domaine vert clair), à 11°C ils se décomposent en eau et méthane (vert foncé). Un écart de 1°C à peine provoque la décomposition des hydrates en gaz et en eau.

5. Leur densité étant plus faible, ils remontent vers la surface, la profondeur diminue donc la pression aussi, ils sortent du domaine de stabilité et se décomposent en donnant du méthane et de l'eau. Une partie du méthane se dissout dans l'eau et une autre s'échappe dans l'atmosphère.

6. Le changement brutal de température de pression provoque la dissociation de l'hydrate de méthane en eau liquide et en méthane gazeux. Le méthane est un gaz incolore (et inodore) dans les conditions de pression et de température ordinaire, et c'est un combustible, il est capable de brûler en présence de dioxygène (fourni par l'air) et d'énergie (flamme).

7. a. On parle de combustion complète, lorsque les produits de la réaction de combustion sont uniquement le dioxyde de carbone (gaz incolore) et de la vapeur d'eau (incolore), dans ce cas la flamme est bleue. Si on observe la couleur de la flamme sur la photo, on constate qu'elle est jaune-orangé. Cela met en évidence la présence de particules de carbone : la combustion est donc incomplète, le dioxygène n'est pas en quantité suffisante.



8. a. C'est un gaz présent dans l'atmosphère terrestre qui intercepte les rayonnements infrarouges ($\lambda > 800 \text{ nm}$) émis par la surface de la Terre. C'est-à-dire un gaz qui est transparent au rayonnement solaire, mais qui empêche le rayonnement infrarouge émis par le sol chauffé de repartir vers l'espace (effet de serre). La présence de gaz à effet de serre dans notre atmosphère est nécessaire, cela permet d'avoir une température élevée près du sol. *Remarque* : sans la présence de ces gaz, la température moyenne de la surface terrestre serait de -18°C plutôt que de $+15^\circ\text{C}$!

b. De nombreux gaz à effet de serre sont naturels : vapeur d'eau, CO_2 , CH_4 , N_2O ou O_3 .

Cependant, l'activité humaine, qui se développe de plus en plus (la population augmente), introduit aussi de nombreux gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Par exemple, la combustion de sources d'énergie fossiles (gaz, pétrole et charbon) fournit une grande quantité de CO_2 .

c. Comme la teneur en gaz à effet de serre augmente, la température va augmenter.

9. Si on les brûle (combustion), il y aura production de CO_2 supplémentaire (un gaz à effet de serre), donc il y aura une élévation de la température, ce qui provoquera des changements climatiques. De plus, l'exploitation risque aussi de provoquer accidentellement la décomposition des hydrates et une partie de méthane

(qui a un énorme pouvoir à effet de serre) s'échapperait aussi vers l'atmosphère.

10. Le réchauffement de la surface planétaire (qui est en route) risque de se propager vers le fond de l'océan et vers le pergélisol. Si la température augmente même de 1 ou 2 °C, les hydrates (qui sont en très grande quantité) sortent du domaine de stabilité (voir question 4), ils se décomposent, en libérant du méthane dans l'atmosphère. Le méthane a un énorme pouvoir à effet de serre, donc cela engendrera une augmentation encore plus importante de la température.

11. a. Si le niveau des océans augmente, la pression au fond des océans aussi, cela pourrait compenser éventuellement l'augmentation de température.

b. Peut-être qu'une partie moins importante d'hydrates se décomposerait...

12. Il serait tentant de considérer le stock gigantesque d'hydrates de gaz comme une future source d'énergie, car les réserves de pétroles et de charbons s'épuisent. Mais la combustion du méthane extrait entraînera la formation de dioxyde de carbone (gaz à effet de serre), ce qui risquera d'entraîner une augmentation du réchauffement climatique déjà enclenché.

Ce réchauffement climatique aura pour conséquence la déstabilisation massive des hydrates et une grande quantité de méthane (gaz à fort effet de serre) sera libérée, ce qui provoquera un emballement climatique (c'est-à-dire cela accélérera encore plus le réchauffement climatique).

Remarques :

– La déstabilisation massive des hydrates pourrait aussi causer des glissements de terrain sous-marins qui entraîneraient des tsunamis très importants.

– En exploitant les hydrates, on risquerait aussi de les déstabiliser, cela provoquerait une libération de méthane, mais aussi des glissements de terrains.

Donc si un jour on les exploite, de nombreuses précautions devront être prises.

ACTIVITÉ 3

Dessaler à moindre frais en polluant moins p. 36

1. L'eau de mer est exposée aux rayons du soleil, ce qui favorise l'évaporation de l'eau et donc la concentration en sels. On peut aussi utiliser la chaleur résiduelle de certaines industries. Si on exploite l'énergie solaire ou la chaleur résiduelle industrielle cela ne nécessite presque pas d'apport d'énergie supplémentaire pour l'évaporation, par contre il faut fournir de l'énergie pour actionner les pompes qui permettent la circulation d'eau. Cependant, cette énergie est aussi nécessaire pour les deux autres procédés.

La distillation est la technique la plus gourmande en énergie, car elle nécessite de chauffer l'eau pour la faire passer à l'état de vapeur.

2. On peut faire l'approximation que l'eau de mer est une solution aqueuse de chlorure de sodium contenant les anions chlorure Cl^- (aq) et les cations sodiums Na^+ (aq).

3. a. Car des solutions de concentrations différentes (à 3,5 % et à 18 %) sont mises en contact, des gradients de concentration sont donc créés.

b. Entre les flux ① et ② et entre les flux ① et ④.

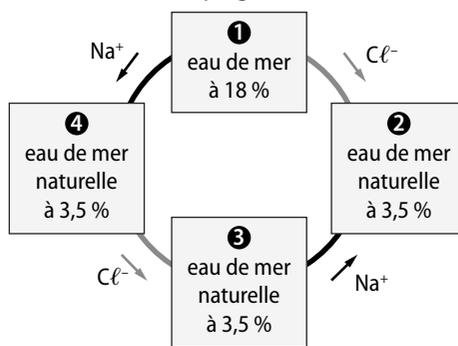
c. Entre les flux ① et ② : le gradient de concentration provoque un déplacement des ions du flux ① (18 %) vers le flux ② (3,5 %). Mais comme ils sont reliés par une jonction perméable uniquement aux anions, seuls les ions chlorures Cl^- (aq) se déplacent.

Entre les flux ① et ④ : le gradient de concentration provoque un déplacement des ions du flux ① (18 %) vers le flux ④ (3,5 %). Mais comme ils sont reliés par une jonction perméable uniquement aux cations, seuls les ions sodium Na^+ (aq) se déplacent (schéma ci-dessous).

4. Un déséquilibre de charges électriques apparaît, un excès de charges positives dans le flux ④ et un excès de charges négatives dans le flux ②. Un gradient électrique va donc apparaître entre les flux ② et ④.

5. La solution qui possède un excès de charges négatives (le flux ②) va attirer les cations sodium Na^+ (aq) du flux ③ (pour assurer l'électroneutralité de la solution), cela est possible grâce à la jonction qui ne laisse passer que les cations.

La solution qui possède un excès de charges positives (le flux ④) va attirer les anions chlorure Cl^- (aq) du flux ③ grâce à la jonction qui ne laisse passer que les anions. Le flux ③ se transforme en eau douce. Car les ions chlorure et sodium quittent progressivement la solution, et l'eau salée se transforme progressivement en eau douce.



— jonction en polystyrène perméable aux cations
 — jonction en polystyrène perméable aux anions

6. Il faut créer un déséquilibre, c'est-à-dire un gradient de concentration, au départ pour amorcer le processus.

7. Non, l'eau de mer possède de très nombreux ions en solution (SO_4^{2-} (aq), Mg^{2+} (aq), CO_3^{2-} (aq)...), mais les ions sodium et chlorure sont les espèces majoritaires.

Cela ne change pas le raisonnement, tous les ions de même signe suivront le « même chemin ».

8. L'eau de mer utilisée ne doit pas être polluée ou contaminée par des toxines. Il faut peut-être aussi lui faire subir un traitement de désinfection (soit au chlore ou aux UV).

9. a. Dans les zones géographiques très ensoleillées (pour faciliter l'évaporation) proche du bord de mer.

b. Car il ne nécessite presque par d'apport d'énergie, alors que les autres procédés utilisent en général comme source d'énergie la combustion du pétrole (ou du gaz ou du charbon) qui émettent du dioxyde de carbone qui est un gaz à effet de serre.

Remarque : aujourd'hui, des efforts sont faits pour exploiter les énergies renouvelables (éolienne par exemple) de façon à diminuer les émissions de CO₂.

c. Toutes les usines de dessalement rejettent des eaux fortement salées dans la nature (les saumures) qui risquent de perturber l'environnement et le milieu marin.

ACTIVITÉ 4

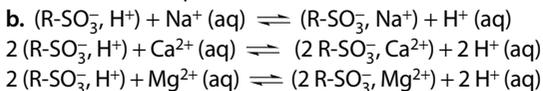
Déminéralisation d'une eau

p. 38

1. Les rinçages à l'eau distillée (qui ne contient pratiquement pas d'ions) vont permettre d'éliminer l'excès d'ions H⁺ (aq) présents sur la résine.

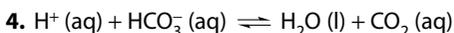
2. a. D'après l'étiquette, il y a les cations :

- calcium : Ca²⁺ (aq),
- magnésium : Mg²⁺ (aq),
- sodium : Na⁺ (aq).



3. a. Dans un premier temps, le pH de l'éluat diminue, c'est-à-dire que l'éluat est plus acide que l'eau distillée, cela signifie que la concentration en ions H⁺ (aq) augmente dans l'éluat. Ensuite, le pH augmente, lorsque l'eau distillée est rajoutée pour rincer la résine.

b. Oui, cela montre, lorsque le pH diminue, que la résine échange les cations de la solution d'eau de Contrex® contre des ions H⁺ (aq). Ensuite, lorsque le pH augmente pour atteindre celui de l'eau distillée, cela montre que tous les cations de l'eau de Contrex® ont été retenus par la résine (il n'y a plus d'échange).



5. a. Soit V le volume d'eau de Contrex® prélevé (V = 10,0 mL).

• Soit n'(H⁺ (aq)) le nombre de moles d'ion H⁺ (aq) cédés par la résine en échange des cations présents dans le volume V :

$$n'(H^+) = n(Na^+) + 2n(Mg^{2+}) + 2n(Ca^{2+}).$$

• Soit n''(H⁺) le nombre de moles d'ion H⁺ (aq) « consommés » par la réaction avec les ions hydrogénocarbonate HCO₃⁻ (aq) présents dans le volume V :

$$n''(H^+) = n(HCO_3^-).$$

• Soit n (H⁺) le nombre de moles d'ion H⁺ (aq) présent dans l'éluat : n(H⁺) = n'(H⁺) - n''(H⁺).

$$n(H^+) = n(Na^+) + 2n(Mg^{2+}) + 2n(Ca^{2+}) - n(HCO_3^-).$$

$$n(H^+) = [(Na^+) \cdot V] + (2[Mg^{2+}] \cdot V) + (2[Ca^{2+}] \cdot V) - ([HCO_3^-] \cdot V).$$

$$n(H^+)_{th} = V \cdot [2[Ca^{2+}] + 2[Mg^{2+}] + [Na^+] - [HCO_3^-]].$$

$$\mathbf{b.} \quad M(Na^+) = 23,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}; \quad M(Ca^{2+}) = 40,1 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1};$$

$$M(Mg^{2+}) = 24,3 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}; \quad M(HCO_3^-) = 61 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}.$$

$$[Ca^{2+}] = 468 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} = 468 \times 10^{-3}/40,1$$

$$= 11,7 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

$$[Mg^{2+}] = 74,5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} = 74,5 \times 10^{-3}/24,3$$

$$= 3,06 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

$$[Na^+] = 9,4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} = 9,4 \times 10^{-3}/23 = 4,09 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

$$[HCO_3^-] = 372 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} = 372 \times 10^{-3}/61$$

$$= 6,1 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

$$n(H^+)_{th} = 10,0 \times 10^{-3} \times [(2 \times 11,7 \times 10^{-3} + 2 \times 3,06 \times 10^{-3} + 4,09 \times 10^{-4}) - 6,1 \times 10^{-3}] = 2,38 \times 10^{-4} \text{ mol}.$$

6. Remarque : on porte l'éluat à ébullition pour chasser tout le dioxyde de carbone dissous, pour déplacer dans le sens direct l'équilibre de la réaction entre les ions H⁺ (aq) et HCO₃⁻ (aq).

a. H⁺ (aq) + HO⁻ (aq) → H₂O (l) : transformation totale.

b. À l'équivalence, les réactifs sont introduits dans les proportions stœchiométriques, c'est-à-dire :

$$n(HO^-) \text{ versé par la burette} = n(H_3O^+) \text{ présent dans l'éluat}$$

$$[HO^-] \cdot V_{\text{équivalent}} = n(H_3O^+) \text{ présent dans l'éluat}$$

avec V_{éq} = 11,5 mL.

$$n(H_3O^+) \text{ présent dans l'éluat} = n(H^+)_{\text{exp}} = 2,0 \times 10^{-2} \times 11,5 \times 10^{-3} = 2,3 \times 10^{-4} \text{ mol}.$$

$$\mathbf{7.} \quad n(H^+)_{th} = 2,38 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \quad \text{et}$$

$$n(H^+)_{\text{exp}} = 2,3 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

Calcul de l'écart relatif :

$$(2,38 - 2,3/2,38)/2,38 \times 100 = 3,4 \text{ \%}.$$

On retrouve à 3,4 % près la valeur théorique calculée.

Raisons possibles :

– concentration de la solution d'hydroxyde de sodium n'est pas exactement à 2,0 × 10⁻³ mol · L⁻¹ ;

– on prélève une partie de la solution à titrer lors des mesures successives du pH avec le papier pH, donc on diminue la quantité d'ions H⁺ (aq) dans l'éluat ;

– mauvais prélèvement du volume d'eau de Contrex® à la pipette jaugée ;

– si n_{exp} > n_{thé} : la résine n'était pas bien rincée au départ, il restait des ions H⁺ (aq) ;

– difficultés d'évaluer le volume à l'équivalence : mauvais remplissage de la burette, mauvaise lecture sur la burette (ménisque), difficultés à évaluer le changement de couleur ;

– propreté de la verrerie...

ACTIVITÉ 5

Les futures richesses de l'océan

p. 40

1. a.

Ressources minérales	Ressources organiques
Terres rares présentes dans des minerais présents dans des boues (matière première pour l'industrie haute technologie) : <i>recherche de techniques pour l'exploitation : ressources d'avenir</i>	Ressources halieutiques vivantes (animales et végétales) des milieux aquatiques exploitées par l'homme (pêche, aquaculture). Poissons, coquillages, algues (nourriture et synthèse de médicament) : <i>déjà exploitées pour l'alimentation et certains médicaments, recherche d'exploitation pour d'autres médicaments : ressources d'avenir</i>
Métaux dans les nodules polymétalliques, les sulfures polymétalliques, dans les encroûtements (or, cuivre cobalt, platine) : <i>recherche de techniques pour l'exploitation : ressources d'avenir</i>	Hydrocarbures (pétrole) source d'énergie : <i>déjà exploitée et recherche de nouveaux gisements</i>
Hydrogène naturel (sous forme de gaz)(source d'énergie) : <i>recherche de techniques pour l'exploitation ; ressources d'avenir</i>	Bactéries (pour la synthèse de médicaments) : <i>déjà exploitée et recherche de nouvelles</i>
	Gaz naturels, hydrates de gaz (sources d'énergie) : <i>recherche de techniques pour l'exploitation pour les hydrates, déjà exploité pour le gaz (recherche de nouveaux gisements)</i>
Diamants (bijouterie) : <i>déjà exploitée</i>	
Charbon (source d'énergie) : <i>déjà exploité</i>	

b. Le gaz naturel, le charbon et les hydrates de gaz.

c. Voir parties en **gras** et en *italique*.

2. a. Les éléments de numéros atomiques compris entre $Z = 57$ et $Z = 71$, $Z = 57$ La (lanthane), $Z = 71$ Lu (lutétium).

b. L'yttrium (Y) $Z = 39$ et le scandium (Sc) $Z = 21$ se trouvent dans la même colonne que le lanthane La ($Z = 57$) dans la classification périodique, ils ont donc des propriétés chimiques voisines.

Remarque : malgré leur nom, les éléments constituant les terres rares ne sont pas rares. Le plus abondant, le cérium, est plus répandu dans l'écorce terrestre que le cuivre, le plus rare, le thulium, est 4 fois plus abondant que l'argent (<http://www.societechimiquedefrance.fr>).

c. La lixiviation acide consiste à extraire des éléments constituants de minéraux en faisant circuler une solution aqueuse acide (solution lixiviante acide). Cette technique est communément utilisée dans le secteur minier pour récupérer des métaux de valeur (argent, or, cuivre, uranium...) à partir de matériaux géologiques. Les trois techniques de lixiviation appliquées dans l'industrie minière sont la lixiviation en tas, la lixiviation en

cuve et la lixiviation *in situ*. La lixiviation *in situ*, parfois dénommée récupération *in situ*, est un procédé visant à dissoudre des métaux tels que le cuivre ou l'uranium directement dans le gisement.

Le risque, c'est de retrouver les solutions acides (accidentellement ou pas) au fond des océans, cela perturberait l'écosystème du fond de l'océan.

d. D'après le document 3, les ressources en terbium doivent être quasiment épuisées en 2012, comme pour l'instant aucune autre source de terbium n'est exploitable, il est nécessaire de le recycler. De plus, cela évite d'être trop dépendant de la Chine pour avoir accès aux terres rares.

3. a. « L'Ifremer a montré récemment que les sources hydrothermales des rides médio-océaniques pouvaient être des sources importantes d'hydrogène naturel. » Ces sources océaniques crachent des gaz sous pression, qui contiennent de 40 % à 50 % d'hydrogène pur. « Il est produit par la réaction de l'eau de mer avec les roches ferreuses issues du manteau terrestre, à haute température et en l'absence d'oxygène, précise Bruno Goffé. Il reste beaucoup de choses à découvrir sur ces sources : mécanismes, répartition, permanence, etc. »

b. Lorsque l'hydrogène est utilisé comme combustible, il n'y a pas production de CO_2 (gaz à effet de serre), mais de l'eau : $\text{H}_2 (\text{g}) + 1/2 \text{O}_2 (\text{g}) \rightarrow \text{H}_2\text{O} (\text{g})$. De plus, l'hydrogène naturel issu du manteau terrestre constitue une ressource inépuisable. L'exploitation de l'hydrogène naturel permettrait de remplacer les ressources fossiles qui s'épuisent et qui génèrent des gaz à effets de serre.

4. On cherche à les exploiter pour en extraire les métaux tels que le fer, le manganèse, et aussi de nickel, cuivre et cobalt, or, argent, zinc. Les ressources naturelles exploitables s'épuisent (voir Doc. 3) et la demande ne cesse d'augmenter. De plus, la richesse en métal dans les sulfures polymétalliques est souvent beaucoup plus grande que dans les minerais exploités à la surface de la Terre (voir Doc. 5). On essaie d'éviter le risque de pénurie d'approvisionnement en métaux comme le cuivre, le zinc, et autres (Doc. 3).

5. Les ressources terrestres s'amenuisent (les matières premières comme les métaux et les sources d'énergie fossiles (pétrole, gaz, charbon) (Doc. 3), la population augmente donc les demandes augmentent aussi. L'océan recouvre une grande surface de la planète (environ 70 %, voir Doc. 7), donc cela offre un immense domaine d'exploitation.

6. Toutes les techniques d'exploitation devront être respectueuses des fonds marins (faunes et flores). Il faut éviter toutes sources de pollutions accidentelles ou non. La journée mondiale de l'océan (Doc. 1), créée depuis 10 ans, sensibilise l'opinion sur la nécessité de préserver l'océan et l'obligation d'une meilleure gestion de ses ressources naturelles.

ACTIVITÉ 6

De l'eau brute à l'eau potable : modélisation p. 42

1. a. Mettre l'eau « sale » dans un bécher sous agitation magnétique. L'eau brute est trouble, a l'odeur de fleur d'oranger, est de couleur marron (la couleur du colorant alimentaire est masquée), avec des particules en suspension, pH environ 6-7 (mesuré au papier pH), conductivité environ $200 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$.

b. Le pH indique la concentration en ion H_3O^+ (aq), c'est-à-dire l'acidité de la solution et la conductivité indique la présence d'espèces conductrices de courant, c'est-à-dire les ions. La conductivité dépend de la nature des ions et de leurs concentrations.

2. a. Il faut prévoir les étapes :

- étape 1 : dégrillage, tamisage ;
- étape 2 : floculation/décantation en ajoutant dans la solution obtenue un agent de coagulation/floculation : ici le sulfate d'aluminium. Il faudra contrôler le pH de la solution pour optimiser l'opération ;
- étape 3 : filtration sur sable de la solution obtenue ;
- étape 5 : filtration sur charbon actif.

b. Étape 4 : l'ozonation ne pourra pas être réalisée au laboratoire, l'ozone a une action bactéricide et antiviral.

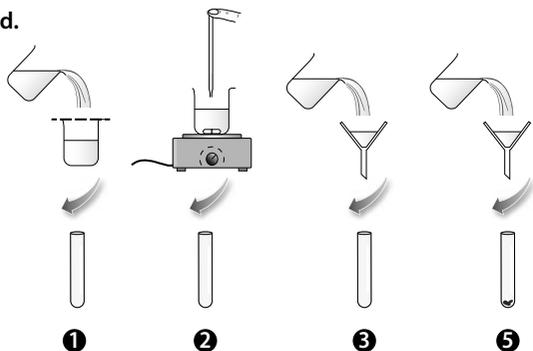
c. Étape 1 : tamis + bécher + tube à essais.

Étape 2 : compte-gouttes + bécher + agitateur magnétique + tube à essais.

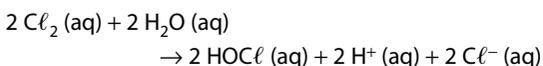
Étape 3 : entonnoir + sable + papier filtre + bécher + tube à essais.

Étape 5 : entonnoir + charbon actif + papier filtre + bécher + tube à essais.

d.

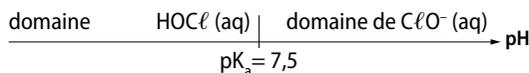


3. a. $\text{Cl}_2(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{Cl}^-(\text{aq})$
 $2\text{HOCl}(\text{aq}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cl}_2(\text{aq}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{aq})$
Réaction de dismutation :



b. Lors de la réaction de dismutation, l'acide hypochloreux $\text{HOCl}(\text{aq})$ est créé. L'acide $\text{HClO}(\text{aq})$ coexiste avec sa base conjuguée $\text{ClO}^-(\text{aq})$ en solution. D'après le diagramme de prédominance, si le pH de la solution est inférieur à 7,5, $\text{HClO}(\text{aq})$ est la forme prédominante

en solution. Il faut donc effectuer la chloration à un pH inférieur à 7,5.



c. L'eau de Javel contient l'ion $\text{ClO}^-(\text{aq})$, qui possède un caractère bactéricide.

4. – Étape 1 : filtration de l'eau brute sur tamis. L'eau est d'abord filtrée à travers une grille afin d'éliminer les plus gros déchets. L'eau obtenue est toujours trouble, de couleur marron (la couleur du colorant apparaît légèrement) et sent la fleur d'oranger. Au bout de quelques minutes, les particules les plus lourdes tombent au fond du bécher : c'est la décantation, cependant l'eau est toujours trouble car des particules (particules colloïdales) très fines restent en suspension dans la solution.

– Étape 2 : on ajoute une solution de sulfate d'aluminium pour rendre l'eau limpide. On agite quelques minutes à l'aide de l'agitateur magnétique et on laisse décanter. Des flocons se forment en solution et se déposent au fond du bécher entraînés par leur poids. Par rapport à la solution obtenue à la fin de l'étape précédente, la décantation est plus rapide et la solution au-dessus du dépôt solide est limpide au bout de quelques minutes. La solution est limpide mais elle est toujours colorée (colorant alimentaire) et sent la fleur d'oranger.

– Étape 3 : on filtre la solution obtenue sur du sable, les particules solides sont filtrées. La solution obtenue est limpide mais elle est toujours colorée et sent la fleur d'oranger.

– Étape 5 : on filtre la solution obtenue sur du charbon actif. La solution obtenue est limpide mais maintenant elle est incolore (ou moins colorée) et elle ne sent plus (ou moins) la fleur d'oranger. Si nécessaire renouveler l'opération.

– Étape 6 : on ajoute une goutte d'eau de Javel pour modéliser l'étape de la chloration.

5. Le sulfate d'aluminium que l'on ajoute à l'eau provoque le regroupement (agglomération) des particules encore présentes (poussières, particules de terre...) en flocons. Ces flocons s'agglomèrent et se déposent au fond du bécher (du bassin pour l'usine de potabilisation) par décantation.

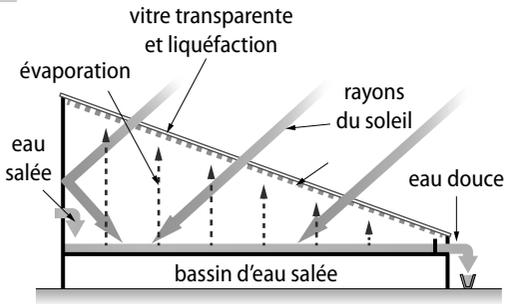
6. Le charbon actif possède une grande capacité d'adsorption, il élimine les composés à l'origine des couleurs, des goûts et des odeurs.

7. L'eau obtenue est limpide et incolore, mais elle n'est pas potable, il faudrait faire une analyse de sa composition (cf. Fig. 1) avant de la consommer. Par exemple, l'eau obtenue possède une grande quantité d'ions sulfate et d'ion aluminium, que nous avons introduit à l'étape 2. De plus, elle n'a pas subi de traitement de désinfection.

EXERCICES

COMPÉTENCE : Analyser des documents scientifiques

1 1.



2. Les rayons solaires traversent la vitre transparente, l'eau salée dans le bassin va chauffer et une partie de l'eau va s'évaporer. La vapeur d'eau va se condenser sur la surface intérieure de la vitre, l'eau formée (sous forme de gouttes) va s'écouler le long de la vitre et tomber dans le récupérateur d'eau douce situé plus bas.

3. La concentration en sel augmente, car le volume de solvant diminue. Si l'eau de mer n'est pas renouvelée, le sel cristallise (principe des marais salants).

- 4. a.** Cela signifie qu'il n'y a plus de sels minéraux dissous, elle contient essentiellement de l'eau.
b. Elle n'est pas potable à long terme, car elle n'apporte pas tous les sels minéraux indispensables à la vie.
c. Il faut la reminéraliser, c'est-à-dire il faut réintroduire les sels minéraux.

2 1. Une eau potable.

2. Les lacs, les rivières et les nappes souterraines.

3. a. Étape ① : dégrillage et tamisage : filtration des plus grosses particules dans un premier temps (dégrillage) et ensuite des plus petites (tamisage).

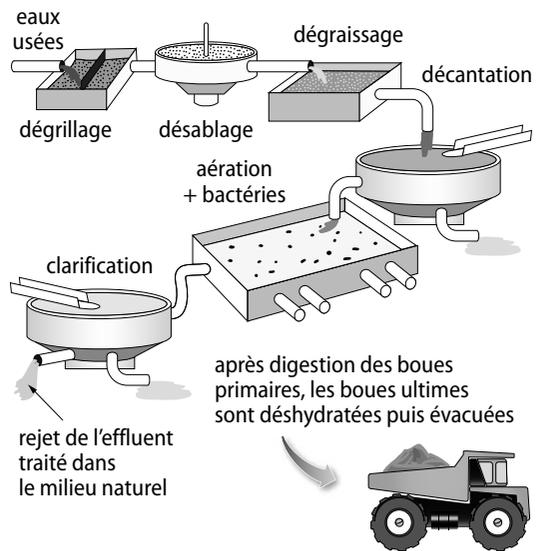
Étape ③ : filtration : adhésion des matières à filtrer sur la surface d'un solide, sans réaction chimique.

b. Dans l'étape ①, les particules sont retenues à l'aide d'un filtre et dans l'étape ② les particules sont adsorbées à la surface d'un solide (sable ou charbon actif).

c. Étape ② : décantation : les particules de petite taille en suspension sont rassemblées, coagulées ; plus grosses et plus lourdes les nouvelles particules « tombent » au fond du bassin.

d. Étape ⑤ : la désinfection élimine les organismes pathogènes (virus, bactéries).

3 1.



2. La désinfection de l'eau (ozonation et chloration).

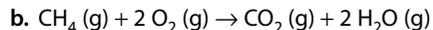
3. Non, c'est l'eau des rivières qui termine l'épuration de l'eau.

4. L'autoépuration naturelle est la capacité qu'a une rivière, qui reçoit des matières organiques à les éliminer. Celles-ci sont progressivement transformées en matières minérales et en CO_2 sous l'action de micro-organismes (bactéries) présents dans le milieu.

5. On peut utiliser les boues comme engrais, ces boues sont fertilisantes car elles sont riches en matières organiques.

4 1. Un hydrate de méthane est un mélange d'eau saturée en méthane et de méthane, qui sous certaines conditions de température et de pression, cristallise sous forme d'un solide. Ce solide est constitué de molécules de méthane, entourées par un réseau de molécules d'eau disposées en cage.

2. a. Car ils contiennent du méthane, qui est un gaz dont la combustion produit de l'énergie, c'est un combustible.



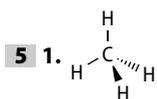
3. a. C'est un projet allemand.

SUGAR acronyme signifiant : *Submarine Gashydrat-Lagerstätten : Erkundung, Abbau und Transport* (gisements sous-marins d'hydrates de gaz : prospection, exploitation et transport).

b. Le but de ce projet consiste à extraire du méthane emprisonné dans les hydrates de méthane sous la mer et à stocker à sa place du CO_2 capté sur des centrales thermiques ou autres installations industrielles. Ce projet pourrait réduire les émissions de CO_2 (gaz à effet de

serre qui contribue au réchauffement climatique) dans l'atmosphère.

4. Le méthane produit moins de CO_2 , lors de sa combustion, que le pétrole ou le charbon (Voir pour préparer le BAC), on le considère comme une source d'énergie « propre ». Le projet SUGAR permettrait à la fois d'extraire le méthane et de diminuer le taux de CO_2 de l'atmosphère (en le piégeant à la place du méthane). Donc cette exploitation du méthane ne contribuerait pas à amplifier l'effet de serre. Par contre, même si la quantité de méthane dans les océans est immense, le stock de méthane s'épuiserait car il ne se renouvelle pas à l'échelle de quelques générations. C'est donc un « approvisionnement énergétique durable » sur quelques générations, pas plus.



2. Le méthane doit être en contact avec de l'eau et les conditions de température et de pression doivent être satisfaisantes pour que les hydrates de méthane naturels puissent se former. On les trouve donc sous des conditions de forte pression et de basse température dans les sédiments océaniques et sous des conditions de très basse température et faible pression dans le pergélisol, c'est-à-dire sous le sol gelé en permanence des régions arctiques.

3. a. Les hydrates, cités dans l'article, ne sont pas des hydrates naturels formés lentement au fond des sédiments océaniques. Ils se forment instantanément, le méthane gazeux s'échappe de la poche où se trouve le pétrole et entre en contact avec l'eau. Comme la pression est grande et la température basse, il cristallise sous forme d'hydrate.

b. Ils bouchent les tuyaux qui permettent de pomper le pétrole.

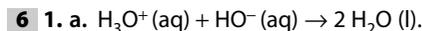
4. La liaison hydrogène est une liaison qui s'établit entre un atome d'hydrogène de la molécule d'eau lié à un atome d'oxygène très électronégatif et un autre atome d'oxygène d'une autre molécule d'eau. Cette liaison correspond à une interaction électrostatique entre l'atome H qui porte un excès de charge positive et le doublet non liant de l'atome O.

Les interactions de type van der Waals correspondent quant à elles à des interactions électrostatiques entre les nuages électroniques des molécules, elles assurent la cohésion entre les molécules, elles sont cependant moins intenses que les liaisons hydrogène.

5. a. $n(\text{CH}_4) = V/V_m = 164 \times 10^{-3}/24,0 = 6,8 \times 10^{-3} \text{ mol.}$

b. $m(\text{CH}_4) = n(\text{CH}_4) \cdot M(\text{CH}_4) = 6,8 \times 10^{-3} \times (12 + 4(1)) = 0,11 \text{ g} = 1,1 \times 10^{-1} \text{ g.}$

COMPÉTENCE : Pratiquer une démarche expérimentale



b. À l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques.

c. D'après la courbe de titrage, le volume équivalent est $V_{\text{éq}} = 25,5 \text{ mL}$ (détermination par la méthode des tangentes ou à l'aide de la courbe dérivée).

D'après les nombres stœchiométriques de l'équation de la réaction de titrage, à l'équivalence, la quantité de matière d'ions $\text{HO}^-(\text{aq})$ versée est égale à la quantité de matière d'ions $\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$ présente dans le volume V_A .

$$D'où c_B \cdot V_{\text{éq}} = [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{SA}} \cdot V_A$$

$$[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{SA}} = c_B \cdot V_{\text{éq}}/V_A$$

$$\text{A.N. : } [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{SA}} = 4,0 \times 10^{-2} \times 25,5/20,0$$

$$= 5,1 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

d. La solution commerciale est diluée 50 fois, donc :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = 50 \times [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{SA}} = 50 \times 5,1 \times 10^{-2}$$

$$= 2,6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

2. En considérant une simple dilution :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = n(\text{H}_3\text{O}^+)_{\text{apporté}}/V_{\text{total}}$$

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = [\text{H}_3\text{O}^+] \cdot v/V_{\text{total}} = 2,6 \times 20 \times 10^{-3}/100$$

$$= 5,1 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

$$\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+] = -\log (5,1 \times 10^{-4})$$

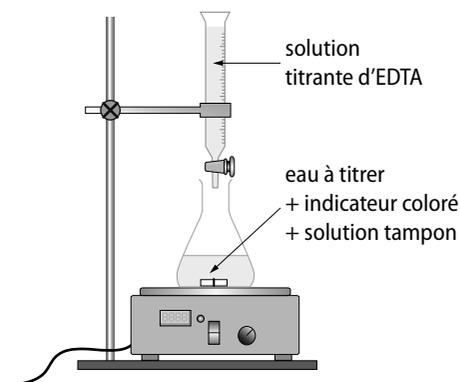
$$= -(\log 5,1 + \log 10^{-4}) = -(0,71 - 4) = 3,3.$$

3. a. Si l'eau est très calcaire, elle contient une grande quantité d'ions $\text{HCO}_3^-(\text{aq})$, qui vont réagir avec les ions $\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$. Les ions $\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$ sont donc consommés, la concentration $[\text{H}_3\text{O}^+]$ diminue et le pH augmente. Le pH a donc une valeur plus élevée que la valeur calculée à la question 2.

b. Dans le cas d'une eau peu calcaire, c'est-à-dire une eau qui contient peu d'ions hydrogénocarbonate $\text{HCO}_3^-(\text{aq})$, la quantité d'ions H_3O^+ consommée serait trop faible. La concentration en ions H_3O^+ serait plus élevée et le pH serait alors proche de la valeur calculée à la question 2 (eau trop acide pour un aquarium).

7 1. Une pipette jaugée de 20,0 mL.

2.



$$3. n(\text{Ca}^{2+}) + n(\text{Mg}^{2+}) = n(\text{EDTA})$$

$$4. [\text{Ca}^{2+}] \cdot V + [\text{Mg}^{2+}] \cdot V = c \cdot V_E$$

$$[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] = \frac{c \cdot V_E}{V}$$

5. Eau n° 1 :

$$[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] = 1,0 \times 10^{-2} \times 6,7/20,0 \\ = 3,4 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

Eau n° 2 :

$$[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] = 1,0 \times 10^{-2} \times 2,9/20,0 \\ = 1,5 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

6. D'après l'énoncé, 1 °f correspond à $10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ d'ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}).

$$\text{Eau n° 1 : TH} = 3,4 \times 10^{-3} / 10^{-4} = 34 \text{ °f.}$$

$$\text{Eau n° 2 : TH} = 1,5 \times 10^{-3} / 10^{-4} = 15 \text{ °f.}$$

7. TH(eau n° 1) > TH(eau n° 2), donc l'eau n° 1 (eau non filtrée) est l'eau la plus dure.

8. La carafe a filtré une partie des ions, la quantité d'ions Ca^{2+} (aq) et Mg^{2+} (aq) contenus dans l'eau du robinet a été divisée environ par 2. On peut dire que le système de filtration est assez efficace.

COMPÉTENCE : Résoudre des problèmes scientifiques

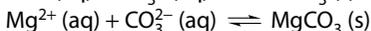
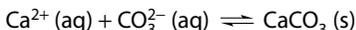
8 Traiter l'eau d'un lave-vaisselle

L'eau du robinet est une eau plus ou moins dure selon les régions. Une eau dure est une eau riche en ions calcium et magnésium. Ces ions, indispensables pour la santé, présentent cependant quelques inconvénients.

Un lave-vaisselle possède un adoucisseur d'eau. C'est l'équivalent d'une résine échangeuse d'ions. Afin de permettre à cet élément de bien fonctionner, il est utile de le régénérer de manière régulière en emplissant le bac à sel avec du sel régénérant qui est constitué à 99 % de chlorure de sodium.

1. Quels sont les inconvénients d'une eau trop dure pour un lave-vaisselle ?

Une eau trop dure favorise la formation de tartre, c'est-à-dire la formation de dépôts blanchâtres (un dépôt de carbonate de calcium et de magnésium) sur la vaisselle et les verres.

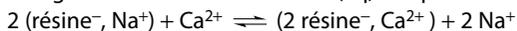


Une eau trop dure peut aussi provoquer des phénomènes d'entartrage des tuyaux.

Ces inconvénients se manifestent surtout avec l'eau chauffée. Plus une eau est chauffée, plus les dépôts sont importants.

2. Quel est le rôle de l'adoucisseur d'eau ?

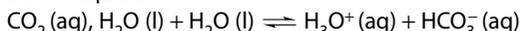
Le rôle de l'adoucisseur d'eau : l'adoucissement d'une eau consiste à remplacer ses cations Ca^{2+} et Mg^{2+} par des ions sodium Na^+ . Les ions sodium, contrairement aux ions calcium et magnésium, ne provoquent pas la formation de tartre. Un adoucisseur d'eau possède une résine échangeuse de cations que l'on peut noter pour simplifier (résine⁻, Na^+). Cette résine fixe les cations Ca^{2+} et Mg^{2+} et libère des cations Na^+ (aq) à la place.



3. Pourquoi faut-il rajouter régulièrement du sel régénérant ?

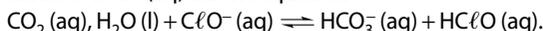
Au bout de quelques cycles de lavage (le nombre de cycles dépend de la dureté de l'eau), tous les ions sodium Na^+ de la résine sont remplacés par les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} , la résine ne peut donc plus jouer son rôle, il faut la régénérer. La régénération est réalisée à l'aide d'une solution aqueuse saturée en chlorure de sodium (Na^+ (aq), Cl^- (aq)). L'ion sodium Na^+ (aq), initialement présent dans la résine et qui a été échangé, peut être à nouveau fixé dans la résine suivant le processus inverse suivant :
 $(2 \text{résine}^-, \text{Ca}^{2+}) + 2 \text{Na}^+ \rightleftharpoons 2 (\text{résine}^-, \text{Na}^+) + \text{Ca}^{2+}$
 $(2 \text{résine}^-, \text{Mg}^{2+}) + 2 \text{Na}^+ \rightleftharpoons 2 (\text{résine}^-, \text{Na}^+) + \text{Mg}^{2+}$
 C'est donc pour régénérer la résine que l'on rajoute régulièrement du sel régénérant (NaCl (s)).

9 1. Le dioxyde de carbone dissous réagit avec l'eau selon l'équation :



Cette réaction produit des ions H_3O^+ (aq). La concentration en ions H_3O^+ (aq) augmente donc dans la solution. Comme $\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+]$, si $[\text{H}_3\text{O}^+]$ augmente, le pH diminue.

2. Le dioxyde de carbone dissous réagit avec l'ion hypochlorite ClO^- (aq) selon l'équation :



La formation d'acide hypochloreux HClO (aq) est favorisée. Or HClO (aq) est un désinfectant plus efficace que l'ion hypochlorite ClO^- (aq) car il possède un pouvoir bactéricide plus important.

3. D'après le diagramme de prédominance du couple HClO (aq)/ ClO^- (aq) :

– si $\text{pH} < \text{pK}_a = 7,5$, c'est la forme acide du couple qui prédomine en solution ;

– si $\text{pH} > \text{pK}_a = 7,5$, c'est la forme basique du couple qui prédomine en solution.

C'est donc pour un pH inférieur à 7,5 que l'acide hypochloreux HClO (aq) devient l'espèce majoritaire.

Eau et énergie

Le programme

THÈME 1 : L'eau

Domaines d'étude	Mots-clés
- Eau et énergie.	- Pile à combustible. - Production de dihydrogène.

Les liens avec l'enseignement spécifique

- Nouvelles chaînes énergétiques.
- Économies d'énergie.
- Chimie durable.

Évaluation diagnostique p. 50

SITUATION 1

Si les élèves songent spontanément à l'eau pour son énergie mécanique utilisée dans les centrales hydrauliques, en revanche ils ne pensent pas forcément à l'électrolyse de l'eau qui va produire de l'hydrogène directement utilisable dans une pile à combustible. C'est cependant une solution alternative pour obtenir du dihydrogène. Dans l'**activité 1**, on cherchera à savoir si elle est intéressante sur le plan écologique et on la mettra en œuvre dans l'**activité 2**.

SITUATION 2

On a étudié en classe de Première le fonctionnement d'une pile. Elle convertit l'énergie chimique en énergie électrique. Dans une pile à combustible, du dihydrogène combiné au dioxygène de l'air produit un courant en rejetant seulement de l'eau. Peut-on produire du dihydrogène au lycée ? Peut-on l'utiliser pour faire fonctionner une pile à combustible ?

L'**activité 2** permet de répondre à ces questions.

SITUATION 3

Les sources d'énergie actuellement utilisées sont polluantes et utilisent des ressources fossiles tendant à disparaître. Pour trouver une alternative, les chercheurs essaient de développer des piles à combustibles rentables dans les véhicules. Les nouveaux moteurs ont

pour but de diminuer la production de dioxyde de carbone. L'**activité 3** permet de comparer le dioxyde de carbone dégagé par les moteurs classiques et celui issu de la production du dihydrogène.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

Production de dihydrogène p. 52

1. On peut fabriquer du dihydrogène par reformage du méthane, à partir de la biomasse, par électrolyse ou photoélectrolyse de l'eau, par action de microbes photosynthétiques, et par décomposition thermochimique de l'eau.

2. a. Le reformage du gaz naturel par de la vapeur d'eau surchauffée (ou vaporeformage) est le procédé le plus courant.

b. Sans catalyseur, le reformage peut se faire avec du carburant contenant des impuretés (ce qui n'est pas possible avec un catalyseur), mais avec un coût énergétique plus important (température de chauffe plus élevée) et un rendement plus faible.

c. Il s'agit de la suppression des impuretés à base de soufre. Le document 5 correspond au procédé catalytique puisqu'il y a une désulfuration préalable au reformage.

3. Écologiquement, on obtient un bilan faible en termes d'émission de CO₂ si on replante ce qu'on utilise.

4. L'Union européenne a mis en place une initiative technologique commune (ITC). Cette association des secteurs public et privé intègre des activités de recherche, de développement technologique et de démonstration.

5. Son principal objectif est d'accélérer le développement des piles à combustibles en Europe et de permettre leur commercialisation entre 2010 et 2020.

6. Le coût et la durée de vie des piles à combustible ainsi que la distribution et le stockage sûr et efficace du dihydrogène sont encore problématiques.

7. Le dihydrogène contenu dans 1 litre d'eau produit 2 kWh.

8. a. $V = 20/2 = 10$ L d'eau.

b. $V_{\text{total}} = 10 \times 65 \times 10^6 = 6,5 \times 10^8$ L d'eau.

9. L'augmentation serait de $10/137 = 7,3$ %.

10. L'énergie issue de dihydrogène peut être considérée comme une énergie « propre » si celui-ci est obtenue à partir de la biomasse, par photoélectrolyse de l'eau ou par action de microbes photosynthétiques. Mais à partir du moment où l'on obtient le dihydrogène avec des produits pétroliers ou de l'énergie nucléaire, est-ce vraiment le cas, sachant que la consommation d'eau augmenterait alors qu'elle n'est déjà pas accessible à tout le monde ?

ACTIVITÉ 2

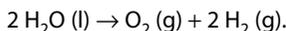
Utiliser du dihydrogène dans une pile à combustible

p. 54

1. Pour le couple $O_2(g)/H_2O(l)$, on a une oxydation selon $2 H_2O(l) \rightleftharpoons O_2(g) + 4 H^+(aq) + 4 e^-$.

Pour le couple $H_2O(l)/H_2(g)$, on a une réduction selon : $2 H_2O(l) + 2 e^- \rightleftharpoons H_2(g) + 2 HO^-(aq)$.

2. L'équation de la réaction est :

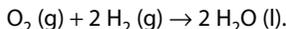


3. Le volume de dihydrogène produit est deux fois plus important que celui de dioxygène. D'après l'équation de la réaction, on constate que l'on doit former deux fois plus de dihydrogène que de dioxygène. Les résultats expérimentaux correspondent à ceux donnés par l'équation bilan.

4. a. Pour le couple $H^+(aq)/H_2(g)$, on a une oxydation selon $H_2(g) \rightleftharpoons 2 H^+(aq) + 2 e^-$.

Pour le couple $O_2(g)/H_2O(l)$, on a une réduction selon : $O_2(g) + 4 H^+(aq) + 4 e^- \rightleftharpoons 2 H_2O(l)$.

b. L'équation de la réaction est :



5. La pile a fonctionné pendant une durée Δt avec une intensité I , donc la charge électrique expérimentale libérée par la pile est $Q_{\text{exp}} = I \cdot \Delta t$.

6. On a obtenu un volume de dihydrogène $V(H_2)$.

La quantité de dihydrogène consommé théoriquement est $n(H_2)_{\text{th}} = V(H_2)/V_m$.

7. On obtient le tableau d'évolution :

(Voir tableau 1 à la fin de la séquence.)

D'après le tableau, on obtient $n_e = 2 n(H_2)_{\text{th}}$

8. Chaque mole d'électron porte une charge de $(N_A \cdot e)$ Coulomb donc $Q_{\text{th}} = n_e \cdot N_A \cdot e = 2 n(H_2)_{\text{th}} \cdot N_A \cdot e$.

9. On calcule le rendement en utilisant la formule donnée, $\rho = Q_{\text{exp}}/Q_{\text{th}}$.

10. Cette pile n'est pas viable pour une utilisation commerciale car son rendement est trop faible (environ 10 à 15 %).

ACTIVITÉ 3

Rouler en limitant les émissions de dioxyde de carbone

p. 56

1. La formule générale d'un alcane est C_nH_{2n+2} avec n entier.

2. a. $2 C_8H_{18}(l) + 25 O_2(g) \rightarrow 16 CO_2(g) + 18 H_2O(l)$

b. L'octane est le réactif limitant car le dioxygène est présent en très grande quantité dans l'air environnant.

3. La formule brute du méthane est CH_4 .

4. $CH_4(g) + 2 H_2O(l) \rightarrow 4 H_2(g) + CO_2(g)$

5. La voiture a consommé 6,5 L d'octane. La masse d'octane consommé est :

$$m_{(\text{octane})} = \rho_{(\text{octane})} \cdot V_{(\text{octane})} = 810 \times 6,5 = 5,3 \times 10^3 \text{ g.}$$

On calcule la masse molaire de l'octane :

$$M(\text{octane}) = 8 M(C) + 18 M(H) = 8 \times 12 + 18 \times 1,0 = 114 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}.$$

La quantité de matière d'octane consommé lors des 100 km est :

$$n_{(\text{octane})} = m_{(\text{octane})}/M_{(\text{octane})} = 5,3 \times 10^3/114 = 46 \text{ mol.}$$

6. On peut utiliser un tableau d'évolution :

(Voir tableau 2 à la fin de la séquence.)

On a $x_{\text{max}} = n_{(\text{octane})}/2 = 46/2 = 23 \text{ mol.}$

7. D'après le tableau d'évolution, la quantité de dioxyde de carbone formé est $n(CO_2) = 16 x_{\text{max}} = 16 \times 23 = 368 \text{ mol.}$ Le volume de dioxyde de carbone formé dans les conditions expérimentales est :

$$V(CO_2) = n(CO_2) \cdot V_m = 368 \times 24 = 8,8 \times 10^3 \text{ L} = 8,8 \text{ m}^3.$$

8. La quantité de dihydrogène consommée est :

$$n(H_2) = m(H_2)/M(H_2) = 1,14 \times 10^3/2,00 = 570 \text{ mol.}$$

9. D'après l'équation bilan de la question 4, on a :

$$n(CO_2) = n(H_2)/4 = 570/4 = 143 \text{ mol.}$$

Le volume de dioxyde de carbone formé par la « Classe B » est :

$$V(CO_2) = n(CO_2) \cdot V_m = 143 \times 24 = 3,4 \times 10^3 \text{ L} = 3,4 \text{ m}^3.$$

10. Le véhicule fonctionnant avec la pile à combustible produit 2,5 fois moins de dioxyde de carbone que le véhicule classique.

11. On devrait essayer de se passer de l'énergie électrique provenant du nucléaire pour essayer de diminuer la production de déchets nucléaires qui posent des problèmes de stockage et de toxicité pour l'environnement. De plus, les centrales fonctionnent avec

l'uranium qui n'est pas une ressource inépuisable, il arrivera un moment où les réserves seront épuisées.

12. L'avantage du dihydrogène produit par des carburants fossiles est le moindre coût de production.

L'avantage des ressources renouvelables est qu'elles sont moins polluantes.

13. Il semblerait que la production de dioxyde de carbone puisse baisser mais il faudrait aussi changer notre mode de vie : développer le co-voiturage, essayer de se passer de son véhicule pour effectuer de courtes distances, avoir une conduite amenant à une consommation plus faible...

EXERCICES

COMPÉTENCE : Analyser des documents scientifiques

1 1. Ces véhicules ne produisent pas directement de dioxyde de carbone.

2. a. Le dihydrogène sous forme liquide occupe moins de place que sous forme de gaz. On peut ainsi stocker ou transporter une plus grande quantité de dihydrogène pour un même volume.

b. On doit le maintenir à une température très faible ($-253\text{ }^{\circ}\text{C}$) ou comprimé sous de fortes pressions (350 à 700 bars). D'un point de vue énergétique, ce stockage est très coûteux.

3. Il permet de produire du dihydrogène en transformant le GPL.

4. Elles permettent de fournir de l'électricité au réseau et, en même temps, d'utiliser dans la station la chaleur dégagée par la réaction.

2 1. Ces ressources fossiles tendent à disparaître et sont polluantes.

2. Les pays se tournent vers des énergies moins polluantes et renouvelables : hydraulique, éolien, solaire.

3. Avec ce type d'énergie, on est dépendant des conditions climatiques.

4. Pour y remédier, les pays envisagent de construire, à proximité des éoliennes, des barrages ou des panneaux photovoltaïques, des électrolyseurs permettant de produire du dihydrogène à l'aide de l'énergie électrique. Il pourra être stocké et réutilisé lorsque les sources d'énergie renouvelables seront insuffisantes.

5. On peut obtenir du dihydrogène en réalisant une électrolyse de l'eau, par reformage du gaz naturel, par un procédé chimique avec des hydrocarbures liquides ou du charbon.

3 1. Ce moteur ne dégage que de l'eau. Il n'est donc pas polluant car il ne produit pas de gaz à effet de serre.

2. Ils estiment que la quantité de dioxyde de carbone formé lors du transport du dihydrogène et son stockage vers les lieux de vente serait plus importante que celle produite par les moteurs classiques.

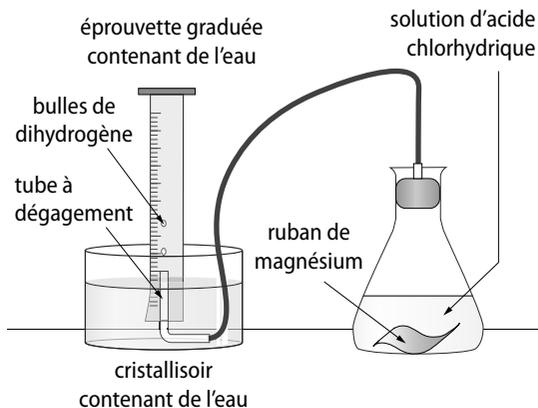
3. Le dihydrogène est un gaz très volatil. Il pourrait s'échapper dans l'atmosphère et en se combinant avec le dioxygène, former de l'eau. L'humidification de l'atmosphère pourrait entraîner la formation de composés nocifs pour la couche d'ozone.

4. Il faudrait changer notre mode de vie : développer le co-voiturage, essayer de se passer de son véhicule pour de courtes distances, avoir une conduite amenant à une consommation plus faible, développer le fret ferroviaire...

5. Actuellement, nous utilisons beaucoup d'énergies polluantes ou dont les réserves en combustible commencent à s'épuiser. Il faut essayer de trouver de nouvelles sources. Le dihydrogène semble être une bonne solution mais lorsqu'on étudie une ressource énergétique, il faut aussi penser à la pollution générée par sa production, son transport sur le lieu de vente et son stockage. Pour le moment, tous les critères ne semblent pas être réunis. Le développement de la technologie permettra peut-être de régler une partie de ces problèmes.

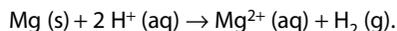
COMPÉTENCE : Pratiquer une démarche expérimentale

4 1. Le schéma est :



2. Lorsqu'on manipule un liquide corrosif, on doit porter une blouse, des gants et des lunettes de protection.

3. L'équation bilan est :



4. En approchant une flamme d'un récipient contenant du dihydrogène, il se produit une petite détonation.

5. La quantité de magnésium est :

$$n(\text{Mg}) = m(\text{Mg})/M(\text{Mg}) = 0,200/24,3 = 8,23 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

La quantité d'ions oxonium est :

$$n(\text{H}_3\text{O}^+) = C \cdot V = 1,00 \times 0,025 = 0,025 \text{ mol.}$$

6. On peut réaliser un tableau d'évolution :
(Voir tableau 6 à la fin de la séquence.)

Si le magnésium est limitant :

$$x_{\text{max}} = n(\text{Mg}) = 8,23 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

Si les ions oxonium sont limitants :

$$x_{\text{max}} = n(\text{H}_3\text{O}^+)/2 = 0,0125 \text{ mol.}$$

Le réactif limitant est le magnésium, l'avancement maximal est :

$$x_{\text{max}} = 8,23 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

7. a. D'après le tableau d'avancement :

$$n(\text{H}_2)_{\text{th}} = x_{\text{max}} = 8,23 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

Le volume de dihydrogène formé est :

$$V_{\text{th}} = n(\text{H}_2)_{\text{th}} \cdot V_m = 8,23 \times 10^{-3} \times 24 = 0,198 \text{ L.}$$

b. L'écart relatif est :

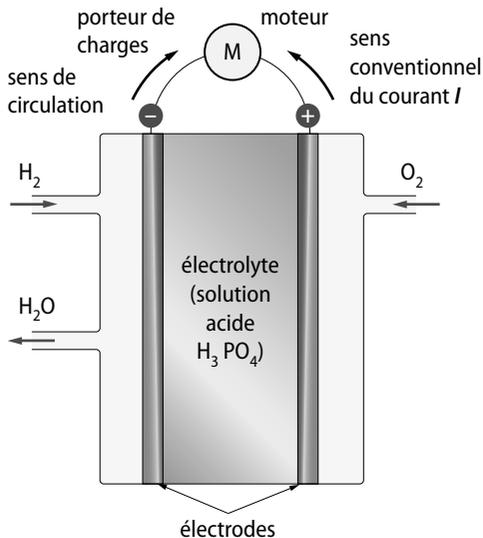
$$|V_{\text{exp}} - V_{\text{th}}|/V_{\text{th}} = |200 - 198|/198 = 1,0 \text{ \%}.$$

8. Non, le magnésium est rare et coûteux et les volumes de dihydrogène faibles. Ce ne serait pas rentable.

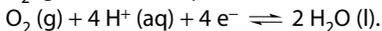
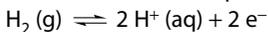
COMPÉTENCE : Résoudre des problèmes scientifiques

5 1. a. Ce sont les électrons.

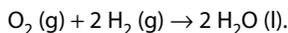
b. On obtient le schéma ci-dessous :



2. a. On a les demi-équations :



b. L'équation de la réaction s'écrit :



c. La réduction a lieu à la cathode qui est le pôle positif de la pile.

3. a. La quantité de dihydrogène dans le réservoir est :
 $n(\text{H}_2) = m(\text{H}_2)/M(\text{H}_2) = (2,5 \times 10^3)/2,0 = 1,25 \times 10^3 \text{ mol.}$
Donc le volume de dihydrogène est :

$$V(\text{H}_2) = n(\text{H}_2) \cdot V_m = 1,25 \times 10^3 \times 24 = 30 \times 10^3 \text{ L} = 30 \text{ m}^3.$$

b. Le volume du gaz dihydrogène est trop important pour être stocké à bord de la voiture.

4. a. La charge électrique libérée est :

$$Q = I \cdot \Delta t = 200 \times 24 \times 3600 = 1,7 \times 10^7 \text{ C.}$$

b. On a $Q = n_p \cdot F$ donc :

$$n_p = \frac{Q}{F} = \frac{I \cdot \Delta t}{F} = \frac{1,7 \times 10^7}{96500} = 179 \text{ moles d'électrons.}$$

D'après la demi-équation, la quantité de dihydrogène consommé en 24 heures est $n(\text{H}_2) = \frac{n_p}{2} = 89,5 \text{ mol.}$

6 1. La masse de dihydrogène utilisée pour le transport dans le monde est :

$$m = 0,01 \times 56,6 \times 10^6 = 5,7 \times 10^5 \text{ t.}$$

2. La masse de dihydrogène consommée par une voiture en France en un an est :

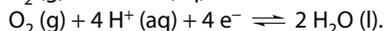
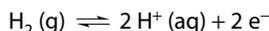
$$1 \times 13000/100 = 130 \text{ kg.}$$

La masse de dihydrogène consommée par l'ensemble des voitures en France en un an est donc :

$$m' = 130 \times 31 \times 10^6 = 4,06 \times 10^9 \text{ kg} = 4,1 \times 10^6 \text{ t.}$$

On ne pourrait donc pas alimenter toutes les voitures, car la production mondiale de dihydrogène réservé aux transports est inférieure à la consommation de toutes les voitures françaises.

7 1. Les équations des réactions à chaque électrode sont :



2. La quantité de dihydrogène est :

$$n(\text{H}_2) = m(\text{H}_2)/M(\text{H}_2) = (3,0 \times 10^3)/2,0 = 1,5 \times 10^3 \text{ mol.}$$

3. La pile contenant 170 cellules :

$$n_c(\text{H}_2) = n(\text{H}_2)/170 = (1,5 \times 10^3)/170 = 8,8 \text{ mol.}$$

4. On a $Q = I \cdot \Delta t$.

5. $Q = I \cdot \Delta t = n_e \cdot N_A \cdot e$ donc $\Delta t = (n_e \cdot N_A \cdot e)/I$.

D'après l'équation : $\text{H}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2 \text{H}^+(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$, il vient $n_e = 2 \cdot n_c(\text{H}_2)$ donc :

$$\begin{aligned} \Delta t &= (2 \cdot n_c(\text{H}_2) \cdot N_A \cdot e)/I \\ &= (2 \times 8,8 \times 6,02 \times 10^{23} \times 1,6 \times 10^{-19})/120 \\ &= 1,4 \times 10^4 \text{ s} = 3,9 \text{ h.} \end{aligned}$$

6. L'autonomie étant très faible, la pile ne peut alimenter qu'un moteur auxiliaire pour d'assez courtes distances.

❶ Tableau de l'activité 2, question 7

Demi-équation		$\text{H}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^-$		
État système	Avancement	Quantité de matière en mol		
État initial	$x = 0$	$n(\text{H}_2)_{\text{th}}$	0	0
Intermédiaire	x	$n(\text{H}_2)_{\text{th}} - x$	$2x$	$2x$
Final	x_f	$n(\text{H}_2)_{\text{th}} - x_f = 0$	$2x_f$	$n_e = 2x_f$

❷ Tableau de l'activité 3, question 6

Équation bilan		$2\text{C}_8\text{H}_{18}(\text{l}) + 25\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 16\text{CO}_2(\text{g}) + 18\text{H}_2\text{O}(\text{l})$			
État système	Avancement	Quantité de matière en mol			
État initial	$x = 0$	$n_{(\text{octane})}$	excès	0	0
Intermédiaire	x	$n_{(\text{octane})} - 2x$	excès	$16x$	$18x$
Final	x_{max}	$n_{(\text{octane})} - 2x_{\text{max}} = 0$	excès	$16x_{\text{max}}$	$18x_{\text{max}}$

❸ Tableau de l'activité 4, question 6

Équation bilan		$\text{Mg}(\text{s}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) \rightarrow \text{Mg}^{2+}(\text{aq}) + \text{H}_2(\text{g})$			
État système	Avancement	Quantité de matière en mol			
État initial	$x = 0$	$8,23 \times 10^{-3}$	0,025	0	0
Intermédiaire	x	$8,23 \times 10^{-3} - x$	$0,025 - 2x$	x	x
Final	x_{max}	$8,23 \times 10^{-3} - x_{\text{max}}$	$0,025 - 2x_{\text{max}}$	x_{max}	x_{max}

Instruments de musique

Le programme

THÈME 2 : Son et musique

Domaines d'étude	Mots-clés
- Instruments de musique.	- Instruments à cordes, à vent et à percussion ; instruments électroniques. - Acoustique musicale ; gammes ; harmonies. - Traitement du son.

Les liens avec l'enseignement spécifique

- Analyse spectrale ; hauteur et timbre.
- Ondes progressives périodiques ; ondes sinusoïdales ; fréquence.
- Conversion d'un signal analogique en signal numérique.

Évaluation diagnostique p. 64

SITUATION 1

Cette première situation a pour but d'amorcer la réflexion sur le fonctionnement d'un instrument de musique. En modifiant la longueur d'onde de la vibration, on modifie la fréquence du son émis et donc la note de musique correspondante.

L'**activité 1** permettra d'étudier plus en détail le comportement d'une corde en musique.

SITUATION 2

Cette deuxième situation a pour objet de vérifier les éventuels acquis de l'enseignement spécifique en ce qui concerne la hauteur et le timbre d'un son.

Ces notions seront mises à profit dans l'**activité 2** pour comprendre les principes de l'acoustique musical.

SITUATION 3

Cette situation a pour objet de traquer une idée fausse. On croit souvent à tort qu'il n'y a pas de différence entre un instrument de musique électrique et un instrument de musique électronique. Pour un instrument de musique électrique, la caisse de résonance présente dans un instrument est remplacée par des micros qui

captent les vibrations et les transforment en signal électrique. Pour l'instrument électronique, la musique est complètement créée par des signaux numériques. L'**activité 5** permettra de réinjecter des compétences de l'enseignement spécifique pour mieux comprendre le fonctionnement des instruments électroniques.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

Comportement d'une corde en musique p. 66

1. Le son est enregistré à l'aide d'un microphone relié à la carte son d'un ordinateur. Si les variations du niveau sonore au cours du temps correspondent à un signal sinusoïdal, le son est pur ; par contre si le signal est périodique mais non sinusoïdal, le son est complexe.

2. $F = m \cdot g_0$

3. La longueur L de la corde.

4. a. On mesure la longueur L de la corde, puis on la pèse pour déterminer sa masse m .

b. La masse linéique est donnée par la relation $\mu = m/L$; elle s'exprime en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$.

5. Le son est complexe.

6. a. Le spectre en fréquence est modifié, les distances entre les pics ne sont plus égales.

b. Le son émis n'est pas agréable à l'oreille.

7. a. et b. La valeur de f_1 dépend de la corde utilisée et de la longueur de celle-ci. Les fréquences mesurées sont par exemple pour une longueur de 70 cm et une masse de 50 g, $f_1 = 18 \text{ Hz}$, $f_2 = 37 \text{ Hz}$, $f_3 = 53 \text{ Hz}$ et $f_4 = 72 \text{ Hz}$.

8. Si la longueur diminue, la valeur de la fréquence augmente pour obtenir deux fuseaux.

9. En augmentant la valeur de la masse m , l'intensité de F augmente. On constate que si F augmente, la valeur de f_1 augmente aussi mais pas proportionnellement.

10. a. La masse de la corde ② de longueur 85 cm est de 4,8 g, sa masse linéique est $\mu = 5,6 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$. Pour la corde ④, elle est de $2,2 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$.

b. La fréquence f_1 est plus importante pour la corde de plus faible masse linéique.

11. En mesurant ces fréquences, on trouve les relations suivantes : $f_4 = 4 \cdot f_1$; $f_3 = 3 \cdot f_1$ et $f_2 = 2 \cdot f_1$. Si on généralise en posant n le rang des harmoniques, on a $f_n = n \cdot f_1$.

12. a. La fréquence dépend, de la masse linéique μ , de la longueur L de la corde et de la force F .

b. La relation correcte est $f_1 = \frac{1}{2L} \cdot \sqrt{\frac{F}{\mu}}$. En effet, si la force

F augmente, la fréquence f_1 augmente aussi ; par contre si L ou μ augmentent, f_1 diminue. On peut également faire ici une analyse dimensionnelle, ou vérifier numériquement cette relation.

13. Le son est harmonieux, si son spectre en fréquence présente des fréquences qui sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale qui est également la hauteur du son.

14. La corde vibre avec un maximum d'amplitude, pour des fréquences particulières, ce sont les fréquences propres de la corde. La corde entre en résonance pour ces fréquences.

15. On modifie la longueur de la corde, et donc sa fréquence fondamentale et ses harmoniques. La note jouée est donc différente.

ACTIVITÉ 2

Produire un son

p. 68

1. L'enregistrement ① correspond à la variation du niveau sonore du son enregistré au cours du temps. L'enregistrement ② est le spectre en fréquence.

2. Ce signal est périodique.

3. À partir de l'enregistrement ①, il faut déterminer la période T , puis calculer la fréquence f . Si on utilise l'enregistrement ②, la hauteur du son correspond à la fréquence du premier pic. C'est la fréquence fondamentale de cette note.

4. Elles sont toutes des multiples entiers de la fréquence fondamentale.

5. On peut enregistrer ce son par l'intermédiaire d'un microphone relié soit à la carte son d'un ordinateur, soit à un oscilloscope à mémoire, soit à l'interface d'un logiciel d'acquisition.

6. a. Ce sont les amplitudes des fréquences qui composent ce son.

b. Un signal périodique sinusoïdal.

c. Il faut en premier créer différents signaux sinusoïdaux qui ont la fréquence et l'amplitude de chaque pic ; puis ajouter ces signaux entre eux.

7. a. et b. Pour chaque son, on mesure la période ou on lit la valeur de la fréquence fondamentale, qui correspond à la hauteur de la note.

c. Non, ce signal n'est pas périodique et des fréquences différentes de multiples entiers du fondamental apparaissent.

8. À l'aide de l'outil pointeur du logiciel, on relève les coordonnées de chaque pic.

9. Oui, les enregistrements sont presque identiques.

10. Un bruit ne présente aucune périodicité, son spectre en fréquence comporte un très grand nombre de pics qui souvent ne sont même pas dissociables.

11. La note créée est assez différente de la note initiale.

12. Ces enregistrements évoluent au cours du temps.

13. Il est possible de recréer une partie du son sur un intervalle de temps très court, mais la reproduction fidèle de la sonorité d'un instrument nécessite la connaissance d'autres paramètres du son, comme son enveloppe et sa durée.

14. Le spectre en fréquence d'un instrument à percussion est bien souvent constitué par des pics qui ne sont pas séparés par des distances égales.

Ce son peut être qualifié d'inharmonique.

ACTIVITÉ 3

Jouer la gamme

p. 70

1. a. Les différents harmoniques d'une fondamentale en musique (appelé premier harmonique en sciences) sont des multiples par des entiers ($k = 2, 3, \dots$) de la fondamentale. L'oreille est sensible à la présence d'harmoniques communs dans différentes notes, ce qui implique des rapports fractionnaires simples (cf. Doc. 1).

b. D'après le document 1, l'oreille est plus sensible pour les consonances notées $1/2$ (qui donne l'intervalle d'octave) et $2/3$ (qui donne l'intervalle de quinte).

2. a. Une gamme chromatique est une gamme formée de 12 notes.

b. La gamme tempérée est une gamme chromatique dans laquelle les 12 notes sont séparées en 12 intervalles égaux.

3. La hauteur de référence aujourd'hui utilisée en musique est le la_3 qui correspond à une fréquence de 440 Hz.

4. On donne le même nom à deux notes séparées d'une ou plusieurs octaves car la consonance entre ces notes est maximale.

5. a. L'intervalle entre deux notes est le rapport entre leur hauteur (fréquence du premier harmonique). L'intervalle entre deux notes varie dans la gamme de Pythagore. Exemple : d'après le document 2 : entre les deux premières notes (*do* et *do#*) : le rapport vaut 1,067 9, puis entre *do#* et *ré* (troisième note de la liste) : le rapport vaut 1,053 5.

b. La courbe du document 2 traduit la construction de la gamme de Pythagore par quinte. Le rapport de fréquence entre deux notes successivement reliées sur le graphe vaut $3/2$ ou $2/3$.

6. a. Par définition dans la gamme tempérée, l'écart entre deux notes est constant.

b. Chaque note dans la gamme tempérée est séparée de la précédente par un demi-ton. Pour obtenir la fréquence de la note suivante, il suffit de multiplier la fréquence de la précédente par un facteur $2^{1/12}$ (soit 1,059 5 environ).

7. a. D'après le document 4, le la_3 baroque est séparé du la_3 standard par un demi-ton environ.

b. Le la_3 baroque est donc dans la gamme standard un $sol\#_3$.

8. Pour construire une gamme en musique, il faut choisir une série de notes classées selon leur fréquence.

9. Une gamme en musique doit à la fois respecter au mieux les consonances, posséder un nombre de notes limité et permettre des transpositions instrumentales simples.

ACTIVITÉ 4

Les tuyaux sonores des orgues

p. 72

1. Les grandeurs physiques qui interviennent dans le son émis par les tuyaux sonores sont la fréquence (hauteur) avec présence d'harmoniques ou non (timbre) et intensité sonore (volume sonore).

2. Lorsque les tubes sont ouverts ou fermés, le comportement des ondes diffère car l'onde stationnaire se terminera soit par un « nœud de pression » (tube fermé), soit « un ventre de pression » (tube ouvert). Ainsi, la fréquence (ou hauteur de la note) sera modifiée de même que la distribution des harmoniques.

3. a. Par l'utilisation d'un haut-parleur relié à un générateur basse fréquence (GBF).

b. On détecte la résonance à l'oreille ou en mesurant l'amplitude de l'onde grâce à un microphone.

4. Il faut repérer le premier harmonique ou fondamental qui correspond à la fréquence de résonance la plus faible, puis augmenter la fréquence du GBF et mesurer la fréquence de l'onde sonore obtenue à chaque résonance (ou celle du haut-parleur excitateur).

5. Il faut utiliser des tuyaux de différentes longueurs (ou une éprouvette dans laquelle on fait varier le volume d'eau).

6. On peut utiliser un microphone à électret (relié à un afficheur numérique ou à un oscilloscope) qui permet de mesurer l'amplitude de la pression à l'intérieur du tube.

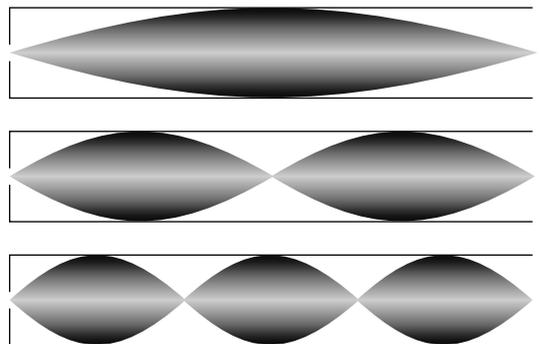
7. Pour un tuyau sonore en verre de 75,0 cm ouverts aux deux extrémités, le premier harmonique est détecté à $2,3 \times 10^2$ Hz. Pour un tuyau de 60,0 cm, le premier harmonique est détecté à $2,8 \times 10^2$ Hz.

	Longueur du tuyau ouvert	
	60,0 cm	75,0 cm
1 ^{er} harmonique	$2,8 \times 10^2$ Hz	$2,2 \times 10^2$ Hz
2 ^e harmonique	$5,7 \times 10^2$ Hz	$4,6 \times 10^2$ Hz
3 ^e harmonique	$8,6 \times 10^2$ Hz	$6,8 \times 10^2$ Hz
4 ^e harmonique	$11,4 \times 10^2$ Hz	$9,1 \times 10^2$ Hz
5 ^e harmonique	$14,3 \times 10^2$ Hz	$11,3 \times 10^2$ Hz

8. Pour un tuyau sonore en verre de 75,0 cm ouvert aux deux extrémités :

Tuyau ouvert (75 cm)	Position des nœuds de pression (en cm)	Position des ventres de pression (en cm)
1 ^{er} harmonique	0 ; 75	38
2 ^e harmonique	0 ; 38 ; 75	19 ; 56
3 ^e harmonique	0 ; 25 ; 50 ; 75	13, 38, 63

9. a. Représentation de l'onde stationnaire pour les trois premiers harmoniques, le tuyau est ouvert aux deux extrémités.



b.

Tuyau (75,0 cm)	Longueur d'onde λ mesurée (en cm)	Fréquence (en Hz) $f = v_{\text{son}}/\lambda$
1 ^{er} harmonique	$75 \times 2 = 150$	$2,3 \times 10^2$
2 ^e harmonique	75	$4,6 \times 10^2$
3 ^e harmonique	50	$6,9 \times 10^2$

On retrouve les valeurs mesurées à la question 7.

10. a. Pour un tuyau sonore en verre de 75,0 cm bouché à l'une de ses extrémités, la première résonance

correspondant au premier harmonique est détectée à $1,1 \times 10^2$ Hz.

Tuyau semi-fermé de 75,0 cm	1 ^{re} résonance	2 ^e résonance	3 ^e résonance
Fréquence (en Hz)	$1,1 \times 10^2$	$3,3 \times 10^2$	$5,5 \times 10^2$

b. Les fréquences de résonance du tuyau fermé se situent au milieu de chaque intervalle formé par les harmoniques successifs du tuyau ouvert.

11. Le tuyau sonore associé à un haut-parleur relié GBF est un modèle sommaire d'un instrument à vent qui ne reproduit fidèlement ni la forme du corps de l'instrument, ni la source d'excitation de la colonne d'air (air sortant de la hanche de l'instrument).

12. La note jouée est déterminée par la longueur du tuyau sonore que compose le corps de l'instrument et son extrémité fermée ou ouverte. Les sons aigus seront favorisés par des tuyaux courts et les sons graves par des tubes longs.

13. La fermeture d'un tuyau sonore abaisse la note jouée d'une octave en divisant la fréquence de la fondamentale par deux. La fermeture du tuyau sonore modifie également son timbre en supprimant les harmoniques de rang pair (cf. question 10.)

ACTIVITÉ 5

Jouer avec un instrument électronique p. 74

1. a. Le CAN est utilisé pour convertir un signal analogique en signal numérique (exemple d'un son joué par un instrument traditionnel enregistré numériquement dans un studio).

b. Le CNA est utilisé pour convertir un signal numérique en signal analogique (exemple d'un synthétiseur qui reproduit un son à partir d'un enregistrement préalablement numérisé).

2. Pour numériser un signal, il faut réaliser son échantillonnage puis sa quantification.

3. Sur le document 3, le signal numérique est représenté par un histogramme en bleu. Le signal analogique est représenté par une fonction continue en vert.

4. La synthèse par modulation de fréquence (FM) et la reproduction de sons préenregistrés.

5. a. Tout instrument électronique doit posséder un CNA pour émettre un son analogique. L'instrument peut aussi posséder un CAN s'il enregistre des sons comme un « sampler » ou échantillonneur numérique.

b. Le filtre lisseur a pour fonction de lisser le signal afin d'obtenir une fonction continue dans le temps à partir d'une série de valeurs discrètes.

6. a. Sur la figure 4, on observe la présence significative de près de vingt harmoniques dans la note jouée

et chacun de ces harmoniques a une évolution temporelle propre qu'il est difficile de reproduire.

b. La technique ADSR modélise l'enveloppe du spectre d'une note jouée par un instrument traditionnel. La synthèse FM permet de générer les harmoniques et de moduler leur amplitude au cours de la note.

7. Un signal analogique est une fonction continue dans le temps, un signal numérique est constitué d'une série de chiffres (« 0 » et « 1 » dans le cas du langage binaire).

8. Le son d'un instrument traditionnel ou d'une voix qui est un signal analogique est converti par un CAN qui prélève des valeurs du signal analogique selon une fréquence d'échantillonnage. Le CAN remplace alors ces valeurs par des valeurs approchées prédéfinies. Le signal ainsi numérisé est enregistré dans la mémoire de l'instrument électronique.

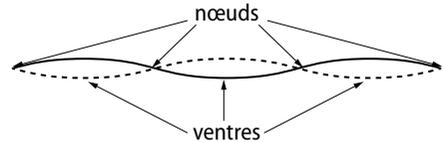
Lorsque le son est joué par l'instrument électronique, le signal numérique lu est converti par un CNA avec l'aide d'un filtre lisseur pour produire un signal continu analogique. Le signal analogique est transmis au haut-parleur qui produit l'onde sonore.

EXERCICES

COMPÉTENCE : Analyser des documents scientifiques

1 A.

1.



harmonique de rang 1
(mode fondamental)
1 fuseau

$$L = \lambda/2 \text{ pour } n = 1$$

harmonique de rang 2
2 fuseaux

$$L = \lambda \text{ pour } n = 2$$

harmonique de rang 3
3 fuseaux

$$L = 3\lambda/2 \text{ pour } n = 3$$

...

$$L = n\lambda/2 \text{ pour } n \text{ quelconque}$$

3. $L = \lambda/2$ pour $n = 1$
donc $\lambda = 2 \cdot L = 2 \times 0,69 = 1,38$ m.

4. a. $2 \cdot T = 8 \times 2,5 = 20$ ms
donc $T = 10$ ms.

b. $f_1 = 1/T = 100$ Hz.

c. En acoustique musicale, cette fréquence est associée à la hauteur du son.

5. a. $v = \lambda \cdot f_1$.

b. $v = 1,38 \times 100 = 138 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

6. a. Mode fondamental : 1^{er} pic. On a bien $f_1 = 100 \text{ Hz}$. On note f_2 et f_3 les fréquences des deux harmoniques immédiatement supérieures à la fréquence fondamentale f_1 , donc :

$$f_2 = 200 \text{ Hz} \text{ et } f_3 = 300 \text{ Hz}.$$

b. $f_2 = 2 \cdot f_1$ et $f_3 = 3 \cdot f_1$.

7. Pour jouer la note à l'octave supérieure, le violoncelle excite la corde avec l'archet tout en appuyant en son milieu, ce qui revient à diviser la longueur L de la corde par deux.

$$L' = L/2 \text{ donc } \lambda' = \lambda/2.$$

La fréquence du son produit est inversement proportionnelle à la longueur de la corde.

$$\text{Donc } f' = 2 \cdot f_1.$$

B. 1. $2 \cdot T = 8 \times 2,5 = 20 \text{ ms}$

donc $T = 10 \text{ ms}$

donc $f = 1/T = 100 \text{ Hz}$.

2. La fréquence du son est la même, donc sa hauteur n'est pas modifiée.

3. En comparant les oscillogrammes des parties A et B :

a. la caractéristique physiologique du son qui a ainsi été modifiée est le timbre (l'allure du signal n'est pas la même donc les harmoniques sont modifiées) ;

b. le son produit par la corde vibrante est complexe sinon l'oscillogramme serait une sinusoïde.

2 A. 1. Un instrument de musique produit un son grâce à une perturbation et une cavité résonante.

2. $4 \cdot T = 4,8 \text{ ms}$

donc $T = 1,2 \text{ ms}$

donc $f_1 = 1/T = 830 \text{ Hz}$.

3. a. $0,8 \text{ kHz} < f_1 < 0,9 \text{ kHz}$. La valeur trouvée à la question 2. est cohérente avec cet encadrement.

b. À l'aide de l'analyse spectrale, on détermine les valeurs approchées des fréquences f_2 et f_3 de deux premières harmoniques :

$$f_2 = 1,7 \text{ kHz} ;$$

$$f_3 = 2,6 \text{ kHz} ;$$

$$\text{donc } f_2 = 2 \cdot f_1 \text{ et } f_3 = 3 \cdot f_1.$$

4. a. Un nœud de vibration est un endroit où l'amplitude de vibration est minimale.

Un ventre de vibration est un endroit où l'amplitude de vibration est maximale.

b. Le joueur peut modifier la longueur de la colonne d'air en ouvrant ou en fermant les trous à l'aide des clés présentes sur la flûte et actionnées par les doigts.

c. Lorsque l'on passe à l'octave supérieure, la fréquence est multipliée par deux, donc la longueur de la colonne d'air est divisée par deux.

B. 1. La grandeur physique commune aux deux cas est la fréquence du signal et donc du fondamental donc la hauteur est la même.

2. La présence et l'importance des différents harmoniques permettent de distinguer ces deux sons. Leur timbre est donc différent.

3 1. a. La gamme est constituée de 7 notes.

b. On passe d'une octave à l'autre en multipliant la fréquence par 2.

2. a. On appelle demi-ton la moitié d'un ton, soit 1/12 de la gamme.

b. Pour passer à un demi-ton supérieur, on multiplie la fréquence par le coefficient $2^{1/12}$.

c. Il y a un ton, donc deux demi-tons, entre le do_3 et le $ré_3$.

$$f(\text{ré}_3) = 2^{2/12} \times f(\text{do}_3) = 2^{2/12} \times 262 = 294 \text{ Hz}.$$

COMPÉTENCE : Pratiquer une démarche expérimentale

4 1. Il s'agit d'un son complexe. Dans le cas d'un son pur, on observerait un signal en forme de sinusoïde.

2. a. On détermine dans un premier temps la période du signal. Pour être plus précis, on détermine la valeur de plusieurs périodes et on divise cette valeur par le nombre de périodes. On en déduit la fréquence, qui est l'inverse de la période.

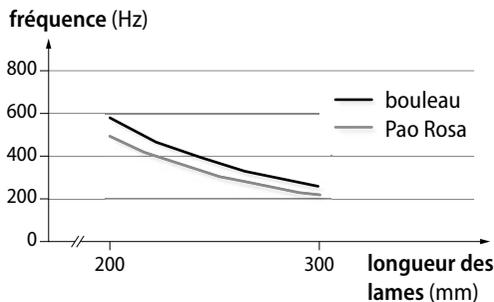
b. $3T = 6,9 \times 8,0/2 = 28 \text{ ms}$ donc $T = 9,2 \text{ ms}$.

Soit $f = 1/T = 1/(9,2 \times 10^{-3}) = 110 \text{ Hz}$.

3. a. La corde utilisée pour l'enregistrement est la corde 6 de la_1 (110 Hz).

b. La corde semble bien accordée car, aux erreurs de mesure près, il y a correspondance entre les deux fréquences.

5 A. 1.



2. a. La fréquence naturelle de la lame diminue quand sa longueur augmente.

- b. Le son émis est donc de plus en plus grave.
3. Pour une même fréquence, la lame de bouleau en Pao Rosa est plus courte.
- B. 1.** $c = \lambda \cdot f$ donc $\lambda = c/f = 340/440 = 77$ cm.
2. $L = \lambda/4 = 19$ cm. La valeur de ce résultat est en cohérence avec celle donnée dans l'énoncé de 194 mm.
3. L'intérêt que le bouchon en bas du résonateur puisse coulisser est de pouvoir adapter le résonateur à tous les types de lames.

6 1. a. La qualité physiologique commune des deux sons enregistrés est la hauteur du son, car c'est la même note qui est jouée. La grandeur physique associée à cette qualité physiologique est la fréquence.

b. On détermine la valeur de plusieurs périodes et on divise cette valeur par le nombre de période.

$$5 \cdot T = 45 \text{ ms} \text{ donc } T = 9,0 \text{ ms.}$$

On en déduit la fréquence $f = 1/T = 110$ Hz.

Et donc que la note jouée est le la_1 .

c. La qualité physiologique qui permet de distinguer ces deux sons est le timbre.

2. a. D'après le spectre en fréquence, $f_1 = 330$ Hz. Ce qui correspond bien à la fréquence de la corde ① (329,5 Hz).

b. D'après le spectre en fréquence :

$$f_2 = 660 \text{ Hz} \text{ et } f_3 = 990 \text{ Hz.}$$

3. a. $2 \cdot L = k \cdot \lambda$ où k est un entier positif.

On en déduit l'expression de la longueur d'onde λ du mode fondamental ($k = 1$) : $\lambda = 2 \cdot L$.

Donc $\lambda = 2 \times 63,0 = 126$ cm.

b. $v = \lambda \cdot f$ donc $v = 1,26 \times 330 = 416 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

4. La longueur d'onde est plus petite.

Comme la célérité des ondes le long de la corde est constante, la fréquence augmente.

5. La pédale *wah-wah* agit sur le timbre (les harmoniques sont modifiées) et sur le niveau sonore (certaines fréquences sont amplifiées).

COMPÉTENCE : Résoudre des problèmes scientifiques

7 Un synthétiseur

Un synthétiseur est un instrument électronique capable de produire des sons générés par des signaux électriques de différentes fréquences. Le synthétiseur original peut produire des signaux de différentes formes (signal sinusoïdal, signal carré, signal triangulaire). Il peut combiner les signaux pour fabriquer des sons complexes. Bien sûr, vous ne pouvez pas imiter les instruments traditionnels avec un synthétiseur mais vous pouvez créer tous les genres de sons que personne n'a entendu avant. Les synthétiseurs modernes font tout avec des digits, en manipulant des nombres avec les puces d'ordinateurs.

1. Qu'est-ce qu'un son complexe ?

Un son complexe est un son qui n'est pas pur et donc son signal n'est pas une sinusoïde.

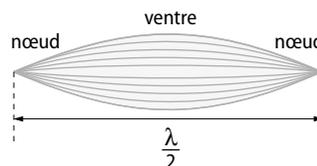
2. Quel est l'intérêt d'utiliser un synthétiseur ?

L'intérêt d'utiliser un synthétiseur est de créer des sons nouveaux.

3. Comment un synthétiseur original produit-il un son complexe ? Et un synthétiseur moderne ?

Le synthétiseur original produit des sons en combinant des signaux électriques de formes différentes. Le synthétiseur moderne produit des signaux numériques.

8 1.



2. $L = \lambda/2$ pour le mode fondamental. On note v la célérité de l'onde.

$$v = \lambda \cdot f_1 = 2L \cdot f_1 \text{ donc } f_1 = v/(2 \cdot L).$$

3. a. La caractéristique d'un son associée à la fréquence d'une note est la hauteur.

b. $f_1 = 440$ Hz.

4. a. $f_7 = 7f_1 = 7 \times 440 = 3\,080$ Hz.

b. En frappant au septième de la longueur de la corde, le marteau élimine l'harmonique 7 du son émis par l'instrument, car il provoque un ventre là où il y avait un noeud.

c. La caractéristique du son émis modifiée est le timbre.

5. La corde de huit mètres de longueur correspondrait à la longueur d'onde la plus grande, donc à la fréquence la plus faible, soit à la note la plus grave.

6. a. L'enroulement du fil de cuivre sur le fil d'acier modifie la masse linéique de la corde.

b. $f = 27,5$ Hz ; $L = 0,50$ m ; $F = 400$ N.

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \lambda \cdot f = 2L \cdot f.$$

En notant m la masse de la corde, on a donc :

$$F = 4L^2 \cdot f^2 \cdot \mu = 4L \cdot f^2 \cdot m.$$

Soit $m = F/(4 \cdot L \cdot f^2)$

$$= 400/(4 \times 0,50 \times 27,5^2) = 260 \text{ g.}$$

9 1. L'intérêt de pouvoir régler la tension des cordes est de pouvoir ajuster la fréquence.

2. L'intérêt d'avoir des cordes ayant une masse linéique différente est de disposer de cordes de même longueur mais ayant des fréquences différentes.

3. a. corde ⑤ : $\mu = 5,80 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$, $f = 110$ Hz, $L = 642$ mm.

$$f = \frac{k}{2 \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{F}{\mu}} \text{ donc pour } k = 1 \text{ (mode fondamental) :}$$

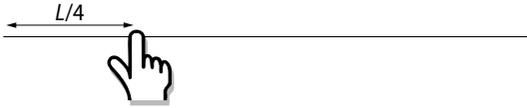
$$f = \frac{1}{2 \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

donc $F = f^2 \cdot 4 \cdot L^2 \cdot \mu$
 $= 110^2 \times 4 \times 0,642^2 \times 5,80 \times 10^{-3} = 116 \text{ N}$.

b. Un guitariste pose le doigt au milieu de cette même corde, donc la longueur d'onde est divisée par 2 et la fréquence est multipliée par 2.

La fréquence est alors de 220 Hz et la note est le la_2

c. Pour émettre le la_3 , la fréquence doit être de 440 Hz, donc la fréquence doit être 4 fois plus importante et donc la longueur d'onde doit être 4 fois moins importante.



ÉVALUATION DES COMPÉTENCES EXPÉRIMENTALES

Une note de musique

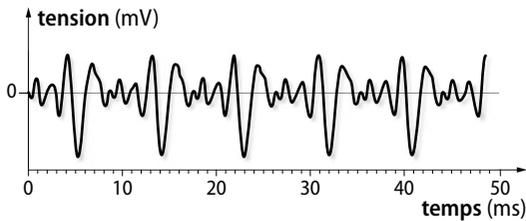
1. Les parties de la guitare qui permettent l'émission d'un son sont :

- les cordes où ont lieu les vibrations ;
- le corps de la guitare qui sert de caisse de résonance.

2. a. Les sons audibles sont compris entre 20 Hz et 20 000 Hz, ce qui correspond à des signaux de période entre 0,05 ms et 50 ms.

Il peut être judicieux de choisir une durée d'acquisition de 50 ms.

b. Exemple d'acquisition :



3. a. On détermine la valeur de plusieurs périodes et on divise cette valeur par le nombre de période.

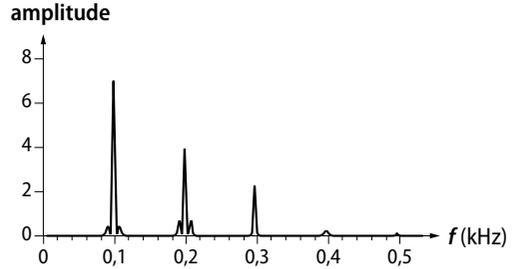
$5 \cdot T = 45 \text{ ms}$ donc $T = 9,0 \text{ ms}$.

b. On en déduit la fréquence $f = 1/T = 110 \text{ Hz}$.

c. Il s'agit de hauteur du son.

d. Et donc la note jouée est le la .

4. a. À l'aide des fonctions du logiciel de traitement du son, on fait une analyse spectrale du signal sonore :



b. On parle de son complexe car il y a plusieurs harmoniques.

c. Fréquence du fondamental :

$$f_1 = 0,1 \text{ kHz.}$$

Fréquences des premiers harmoniques :

$$f_2 = 0,2 \text{ kHz, } f_3 = 0,3 \text{ kHz, } f_4 = 0,4 \text{ kHz, } f_5 = 0,5 \text{ kHz.}$$

d. Ces différents harmoniques sont associés au timbre.

e. Relation entre la fréquence du fondamental et la fréquence du premier harmonique :

$$f_2 = 2 \cdot f_1.$$

Relation entre la fréquence du fondamental et la fréquence du premier harmonique :

$$f_3 = 3 \cdot f_1.$$

Émetteurs et récepteurs sonores

Le programme

THÈME 2 : Son et musique

Domaines d'étude	Mots-clés
– Émetteurs et récepteurs sonores.	– Voix ; acoustique physiologique. – Microphone ; enceintes acoustiques ; casque audio. – Reconnaissance vocale.

Les liens avec l'enseignement spécifique

- Ondes sonores et ultrasonores.
- Niveau d'intensité sonore.
- Ondes progressives périodiques ; ondes sinusoïdales ; fréquence.
- Signaux analogique et numérique.

Évaluation diagnostique p. 84

SITUATION 1

Cette situation a pour objet de vérifier que les élèves ont bien acquis que le niveau d'intensité sonore se mesure à l'aide d'un sonomètre. Mesurer l'intensité sonore permet notamment de légiférer.

Le sonomètre sera évoqué dans l'**activité 2** qui traite de l'acoustique physiologique. Les élèves seront amenés à utiliser le sonomètre pour mesurer des niveaux d'intensité sonore pour mettre en évidence certaines propriétés des émetteurs sonores comme les haut-parleurs dans l'**activité 4** ou les casques audio dans l'**activité 5**.

SITUATION 2

Cette situation a pour objet de traquer une idée fausse. On croit souvent à tort que le niveau d'intensité sonore diminue de façon linéaire quand on s'éloigne d'une source sonore.

Or doubler la distance émetteur-récepteur revient à diminuer le niveau d'intensité sonore de -6 dB. Les élèves découvriront cela dans l'**activité 4**.

SITUATION 3

Cette troisième situation a pour but d'inciter l'élève à réquisitionner toutes ses connaissances sur la voix, le

son et la conversion analogique-numérique pour essayer de comprendre le principe de la *reconnaissance vocale*. Ce principe sera abordé dans l'**activité 6**.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

La formation de la voix

p. 86

1. a. La voix est une onde *de pression dans l'air* (Doc. 3) émise par le système de phonation humaine. Il s'agit d'une onde sonore (Doc. 1) qui se propage dans l'air. On parle d'*onde de pression* car elle correspond à une vibration des couches du milieu de propagation (une succession de compressions et de détentes des tranches d'air). La voix est donc une onde mécanique progressive longitudinale.
b. L'enregistrement d'un son pur correspond à celui d'une simple sinusoïde et est caractérisé par une seule fréquence. D'après les documents 4 et 1, la voix produit des sons complexes constitués d'une fréquence fondamentale et d'harmoniques.

2. a. Les organes mis en jeu dans la formation de la voix sont :

- le système respiratoire (les poumons et l'air qu'ils apportent dans la trachée) ;
- les cordes vocales présentes dans le larynx ;
- la gorge (le pharynx) et les cavités buccale et nasales ;
- la bouche (et les lèvres).

b. Les poumons jouent le rôle d'une soufflerie en permettant à l'air nécessaire à la production de la voix de s'écouler le long de la trachée.

Les cordes vocales sont la véritable source sonore. En vibrant à une fréquence donnée lors du passage de l'air expiré, elles génèrent des ondes sonores.

Le pharynx et les cavités buccale et nasale (c'est-à-dire l'ensemble du conduit situé entre les cordes vocales et les lèvres) jouent le rôle d'un résonateur ou d'une caisse de résonance dont le rôle est d'amplifier certaines fréquences ou harmoniques du son de la voix et d'en atténuer d'autres. La bouche est l'émetteur qui transmet la voix au milieu de propagation extérieur.

c. On retrouve dans tout instrument de musique des éléments dont le rôle est comparable : l'archet est le poumon du violon qui permet de faire vibrer les cordes ; les cordes en sont la source sonore ; la table d'harmonie ou la caisse de résonance le résonateur, les ouïes l'émetteur du son.

3. a. La hauteur de la voix (sa qualité plus ou moins grave) est imposée par la fréquence de vibrations des cordes vocales. Plus elles vibrent rapidement, plus les vibrations sont fréquentes, plus la hauteur de la voix est importante et inversement.

Le timbre est lié à la présence d'harmoniques en nombre plus ou moins important associés à la fréquence fondamentale. Il est déterminé par la forme et les dimensions du résonateur (plus le résonateur présente un volume important, plus il amplifie les harmoniques graves).

L'intensité traduit la force (son fort ou faible) avec laquelle un son est perçu. Elle est liée à l'amplitude des vibrations (compressions-détentes) des couches d'air qui remontent la trachée. C'est l'amplitude des oscillations des cordes vocales qui permet de moduler l'intensité de la voix.

b. Il est alors possible de faire varier la hauteur du son de la voix en modifiant les dimensions (longueur et épaisseur) des cordes vocales. (Cela s'effectue grâce à des mouvements du larynx qui modifient la tension des cordes vocales.)

4. a. D'après le document 4, les deux enregistrements sont périodiques. La fréquence fondamentale f_0 du son « o » émis par la voix féminine est plus élevée que celle émis par la voix masculine. De plus, l'enregistrement du son « o » féminin présente un nombre moins important d'harmoniques.

b. Le son « o », émis par la voix féminine, sera perçu plus aigu et différemment : la couleur du « o » sera différente (plus « pur »).

c. Pour le « o » féminin : $T \approx 11 \times 10^{-3} / 5 = 2,2$ ms soit :

$$f_0 = 4,5 \times 10^2 \text{ Hz.}$$

Pour le « o » masculin : $T \approx 18,5 \times 10^{-3} / 4 = 4,6$ ms soit :

$$f_0 = 2,2 \times 10^2 \text{ Hz.}$$

L'analyse spectrale de chaque son fait apparaître une fréquence fondamentale identique.

d. La fréquence fondamentale f_0 correspond à la fréquence de vibration des cordes vocales. Elles vibrent donc plus rapidement chez la femme.

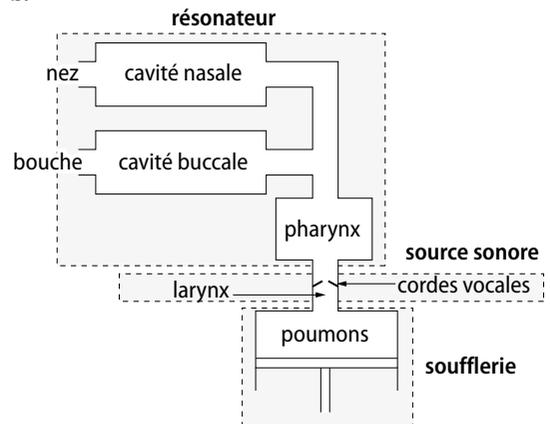
Les cordes vocales étant plus courtes chez la femme, elles vibrent plus rapidement : la voix est plus aiguë.

5. En modifiant le milieu de propagation (l'air présent dans la trachée est remplacé par de l'hélium, un gaz inerte dans lequel les sons se propagent environ 3 fois plus rapidement), les harmoniques amplifiés et ceux atténués sont différents. Pour une fréquence de vibration des cordes vocales donnée, les fréquences des harmoniques amplifiés seront différentes (plus élevées) : la voix paraît plus aiguë.

6. a. Le principe de formation de la voix par le système de phonation humain est le suivant :

- l'appareil respiratoire, telle une soufflerie, génère une surpression de l'air dans la trachée provoquant la mise en vibration des cordes vocales et la création d'une onde sonore ;
- certaines fréquences de l'onde sonore produite sont alors amplifiées par les cavités bucco-nasales et le pharynx alors que d'autres sont atténuées ;
- le son est transmis au milieu de propagation par la bouche.

b.



7. La voix de chaque individu est unique car elle dépend de la morphologie du système de phonation. Les dimensions de ses cordes vocales, la taille et la forme de ses cavités résonnantes conditionnent la hauteur, le timbre et l'intensité de la voix. La fréquence fondamentale f_0 de la voix est ainsi propre à chaque individu.

ACTIVITÉ 2

L'audition

p. 88

1. La puissance acoustique P , la pression acoustique p , l'intensité acoustique I , le niveau d'intensité sonore, la fréquence, l'énergie sonore.

2. a. L'échelle en dB traduit la sensibilité de l'oreille selon l'intensité d'un son. C'est une échelle logarithmique pour rendre compte de la perception de l'oreille.

b. L'échelle doit être pondérée pour tenir compte de la sensibilité de l'oreille en fonction de la fréquence du son.

3. Le seuil d'audibilité pour l'oreille correspond à une pression acoustique de $2,0 \times 10^{-5}$ Pa et un niveau d'intensité sonore de 0 dB. Le seuil de douleur correspond à une pression acoustique de 20 Pa et un niveau d'intensité sonore de 120 dB.

4. Un audiogramme est un examen médical qui teste l'audition. Il évalue la perte d'audition en dB pour différentes fréquences audibles.

5. a. La grandeur acoustique qui caractérise l'émetteur sonore est la puissance acoustique P . C'est une puissance donc elle s'exprime en watt (symbole W).

b. Le récepteur sonore étudié en acoustique physiologique est l'oreille.

La grandeur acoustique qui le caractérise est la pression acoustique p .

6. a. L'intensité acoustique I est une puissance par unité de surface, elle s'exprime donc en $W \cdot m^{-2}$.

Le niveau d'intensité d'intensité sonore L s'exprime en dB.

b. Si l'intensité acoustique est multipliée par 2, alors $L' = 10 \times \log(2 \times I/I_0) = 10 \times \log(2) + 10 \times \log(I/I_0) = 3,0 + L$. Lorsque l'intensité acoustique de la source est doublée, le niveau d'intensité sonore augmente bien de 3 dB.

7. Le niveau d'intensité sonore donc l'intensité acoustique décroît lorsque la distance à la source augmente.

8. Une source sonore exerce une pression dite pression acoustique sur le tympan.

9. Il faut mesurer le niveau d'intensité sonore de la source puis le pondérer pour tenir compte de la sensibilité de l'oreille pour chaque fréquence sonore.

10. a. On peut s'éloigner de la source car en s'éloignant de la source, le niveau d'intensité sonore diminue.

b. On peut réaliser un audiogramme pour vérifier que l'audition n'a pas été affectée.

ACTIVITÉ 3

Caractéristiques d'un micro

p. 90

1. a. En sortie, le microphone transmet une tension électrique (entre ses bornes) mesurable sur un oscilloscope.

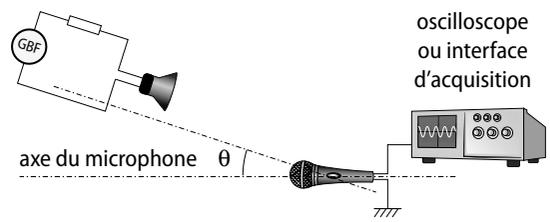
b. Par la mesure de sa fréquence et de son amplitude. La fréquence du signal est liée à celle du son capté, l'amplitude à son intensité.

c. Pour que le signal (la tension électrique fournie) soit détectable sur un oscilloscope.

2. a. L'amplitude de la tension transmise par le microphone augmente lorsque le son est plus intense ou lorsque la distance source-microphone diminue.

b. En conservant la distance source-microphone et l'intensité du son constantes, la sensibilité du microphone pourra être évaluée à partir de l'amplitude de la tension transmise en sortie.

3. a.



b. Il faut déplacer la source tout en conservant une distance au microphone constante.

c. L'incidence est normale lorsque la direction de propagation des ondes sonores est parallèle à l'axe du microphone : l'onde arrive alors perpendiculaire à la membrane.

Mesures

	$f_{GBF} = 64,7 \text{ Hz}$	$f_{GBF} = 2,034 \text{ kHz}$	$f_{GBF} = 9,283 \text{ kHz}$
	f du signal transmis		
À 5 cm	64,57 Hz	2,035 kHz	9,058 kHz
À 10 cm	64,34 Hz	2,035 kHz	9,295 kHz
À 16 cm	64,96 Hz	2,035 kHz	9,315 kHz
À 22 cm	64,74 Hz	2,033 kHz	9,286 kHz
À 28 cm	65,08 Hz	2,037 kHz	9,147 kHz

Pour une fréquence de 870 Hz

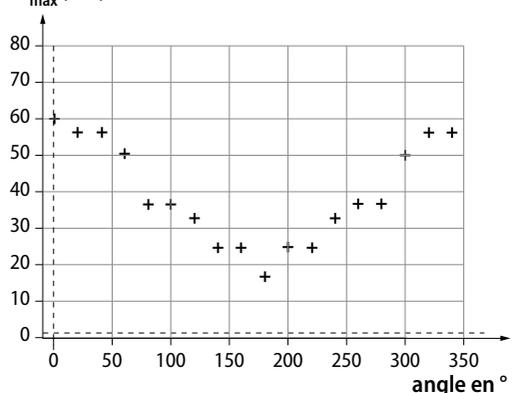
Angle d'incidence θ (en $^\circ$)	0	20	40	60	80	100	120	140	160
Amplitude de la tension (en mV)	60	56	56	50	36	36	32	24	24
Angle d'incidence θ (en $^\circ$)	360	340	320	300	280	260	240	220	200
Amplitude de la tension (en mV)	60	56	56	50	36	36	32	24	24

4.

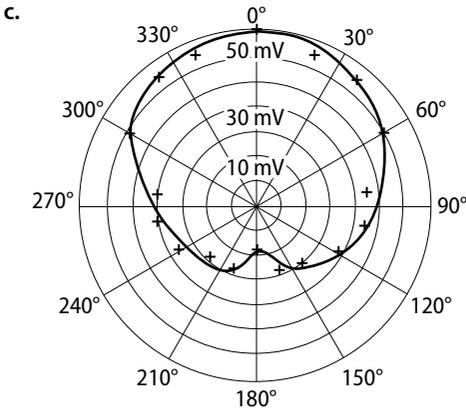
	$f_{GBF} = 64,7 \text{ Hz}$	$f_{GBF} = 2,034 \text{ kHz}$	$f_{GBF} = 9,283 \text{ kHz}$
f_{moy} du signal transmis	64,73 Hz	2,035 kHz	9,220 kHz
Écart relatif	$4,64 \times 10^{-2} \%$	$4,92 \times 10^{-2} \%$	$6,79 \times 10^{-1} \%$

La fidélité du microphone étudié diminue légèrement en hautes fréquences (ici supérieures à environ 10 kHz).

5. a. U_{max} (mV)



b. Ce graphique ne permet pas une visualisation pratique et rapide de la directivité du microphone.



6. a. Les sons provenant de l'avant (incidence normale ou nulle) sont principalement captés par le microphone.
 b. Il s'agit d'un microphone unidirectionnel ou cardioïde.

7. La réponse (ou fidélité) d'un microphone dépend de la fréquence du son capté. Il en est de même pour les diagrammes de directivité qui n'auront pas forcément la même allure dans tous les domaines de fréquences.

8. L'enregistrement d'un dialogue entre deux comédiens nécessite l'utilisation d'un microphone qui capte principalement les sons provenant de deux directions différentes et reste insensible à ceux provenant des autres directions. Il s'agit donc d'un microphone bidirectionnel (sensible aux sons issus de l'avant et de l'arrière de sa membrane). Il s'agit alors de placer les interprètes de part et d'autre du microphone.

L'enregistrement d'un son d'ambiance nécessite un microphone qui ne privilégie aucune direction d'incidence particulière et capte au contraire les sons provenant de toutes les directions. Il faut choisir un microphone omnidirectionnel.

ACTIVITÉ 4
Enceintes acoustiques

p. 92

1. Les sons de basse fréquence sont des sons graves, ils seront envoyés vers les haut-parleurs de type « woofers ». Les sons de haute fréquence sont aigus, ils seront envoyés vers les « tweeters ».

2. a. Par définition $L = 10 \log (I/I_0)$ avec :
 $I_0 = 1,00 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. D'où I est la puissance sonore par m^2 de surface. L a pour unité le décibel (dB).

b. L'appareil qui permet sa mesure et qui est photographié en figure 2 est appelé le sonomètre.

3. Il suffit de faire une mesure de L à l'aide du sonomètre pour un haut-parleur puis de faire la même mesure avec deux haut-parleurs identiques, diffusant le même son,

à la même puissance sans changer la distance haut-parleur-sonomètre.

4. a. Le GBF permet de choisir la fréquence du signal émis.

b. Il est inutile de dépasser le domaine des sons audibles par l'Homme. Ainsi, la gamme pertinente se situe entre 20 Hz et 20 kHz.

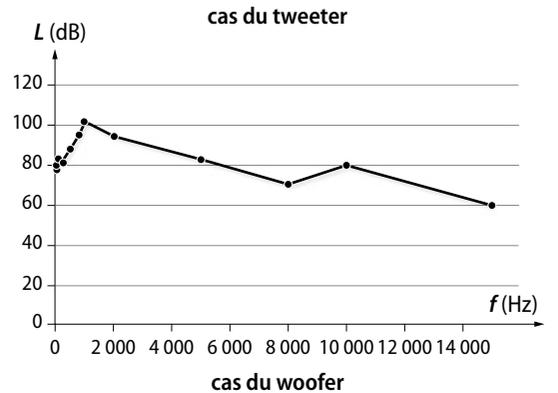
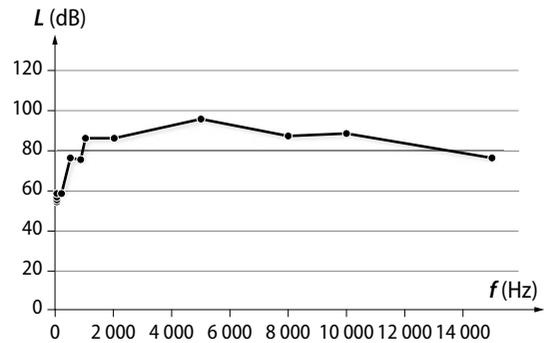
c. On peut modifier l'amplitude de la tension délivrée par le GBF. Lorsqu'on étudie l'influence d'un paramètre sur un phénomène, il faut garder tous les autres paramètres constants. Dans cette expérience, seule la fréquence sera modifiée.

5. Il suffit, pour un même haut-parleur, de faire émettre un son de haute fréquence et un son de basse fréquence et pour chaque cas, de vérifier avec le sonomètre s'il y a une forte atténuation lorsqu'on se déplace latéralement, tout en maintenant le sonomètre dirigé vers le haut-parleur.

6. En fait, lorsqu'on prend deux haut-parleurs, le niveau d'intensité sonore n'augmente que de 3 dB.

7. a. On obtient les valeurs suivantes : (Voir tableau ❶ à la fin de la séquence.)

b. Représentation graphique de l'évolution du niveau d'intensité sonore L (en dB) en fonction de la fréquence f (en Hz) pour les deux haut-parleurs.



8. a. En face du gros haut-parleur, pour $f = 200$ Hz, on obtient $L = 76,5$ dB.

b. Pour une direction à 60° de l'axe du haut-parleur, pour $f = 200$ Hz, on obtient $L = 73,9$ dB.

9. Avec $f = 4$ kHz : pour la mesure en face, on a $L = 70$ dB, pour la mesure latérale $L = 54$ dB.

	En face du haut-parleur	À 60° de la direction principale
$f = 200$ Hz	56,8	56,4
$f = 4$ kHz	80,0	72,1

11. Le caisson phonique permet d'atténuer les échanges sonores avec l'extérieur. Le niveau d'intensité sonore mesuré est presque uniquement dû au haut-parleur.

12. Pour l'expérience « le niveau d'intensité sonore », il faut comparer avec deux haut-parleurs identiques, produisant le même son avec chacun le même niveau d'intensité sonore et en les plaçant côte à côte. Le sonomètre est toujours placé à la même distance. On met en évidence l'influence du nombre de haut-parleurs. Pour la « réponse en fréquence d'un haut-parleur », il faut maintenir la distance avec le sonomètre constante, ainsi que l'amplitude de la tension d'alimentation. On fait varier la fréquence uniquement.

Pour la directivité d'un haut-parleur, on fait varier la direction du sonomètre, mais pas sa distance. On effectue des mesures pour deux fréquences différentes et pour deux haut-parleurs différents.

13. Le « woofers » a la meilleure réponse en fréquence dans les sons graves. Le « tweeter » a la meilleure réponse dans les sons aigus.

14. Le « woofers » est plus directif que le « tweeter » car pour chaque fréquence, il y a une plus forte diminution du niveau d'intensité sonore pour une direction à 60° de l'axe du haut-parleur (on remarque de plus que les sons aigus sont plus directifs que les sons graves).

ACTIVITÉ 5

Le casque audio

p. 94

1. Pour évaluer les risques du casque audio pour l'audition, il faut tenir compte de la distance à la source (aux écouteurs), de la durée d'écoute et du niveau d'intensité sonore de la source.

2. On évalue sa fidélité dans la restitution des fréquences et sa « bande passante ».

3. a. $L = 10 \times \log(I/I_0)$ avec I l'intensité acoustique (sonore) de la source en $W \cdot m^{-2}$, I_0 l'intensité acoustique de référence telle que $I_0 = 1,00 \times 10^{-12} W \cdot m^{-2}$ et L le niveau d'intensité sonore en dB.

$$b. L = 10 \times \log(P/I_0 \cdot 4\pi \cdot d^2) \\ = 10 \times \log(P/I_0 \cdot 4\pi) - 10 \times \log(d^2)$$

$$L = 10 \times \log(P/I_0 \cdot 4\pi) - 20 \times \log(d).$$

Le niveau d'intensité sonore diminue lorsque la distance augmente.

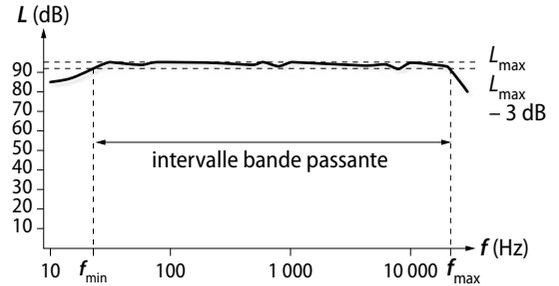
4. a. On va utiliser un GBF pour alimenter le casque audio par un signal électrique de tension maximale constante et de fréquence variable.

b. Pour mesurer un niveau d'intensité sonore, on utilise un sonomètre.

5. Résultats attendus :

d (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$L - L_{ref}$ (dB)	0	-6,0	-9,5	-12	-14	-15,5	-17	-18	-19

6. et 7. Résultats attendus (voir courbe ci-dessous). On se place en échelle logarithmique pour l'échelle des fréquences.



8. a. Si d est multipliée par n , alors $L' = L/n^2$

$$L' = 10 \times \log(I/(n^2 \cdot I_0)) = 10 \times \log(I/I_0) + 10 \times \log(1/n^2)$$

$$L' = L - 20 \log(n).$$

b. Comparer les résultats obtenus à la question 5. avec les valeurs attendues (voir tableau ci-dessus) en évaluant par exemple l'écart relatif pour chaque mesure.

c. On a pris pour référence le niveau d'intensité sonore pour $d = 10$ cm pour n'avoir ensuite que des multiples de cette distance et donc faciliter les calculs.

9. Si le niveau sonore est constant et maximal pour des fréquences comprises entre 20 et 20 000 Hz, le casque reproduit fidèlement les fréquences audibles.

10. a. et b. Voir courbe ci-dessus pour le principe de la mesure.

11. Pour un même niveau d'intensité sonore d'écoute, on peut classer, en terme de dangerosité croissante, les écouteurs dans l'ordre suivant : écouteurs intra-auriculaires, casque audio, baffles.

En effet, la source est dans cet ordre de moins en moins proche du tympan et donc le niveau d'intensité sonore au niveau du tympan, de plus en plus faible.

12. La fidélité du casque audio est satisfaisante s'il reproduit les fréquences du domaine audible donc si sa bande passante inclut l'intervalle de fréquence 20-20 000 Hz.

ACTIVITÉ 6

La reconnaissance vocale

p. 96

1. a. Les deux techniques sont l'approche analytique et l'approche globale.

b. Non, dans la technique globale, la phrase est décomposée en mots, dans la technique analytique, elle est décomposée en phonèmes.

c. L'avantage de la technique globale : la reconnaissance des mots est beaucoup plus fiable. Son inconvénient est qu'il faut créer une base pour chaque mot attendu. La quantité d'informations devient très vite importante. L'avantage de la technique analytique est qu'il n'est pas nécessaire de constituer une base importante : 36 phonèmes suffisent. L'inconvénient est que la reconnaissance est moins précise.

2. Pour que le logiciel identifie les phrases citées, il faut qu'il en interprète le sens. Cela permet de distinguer parmi des phrases phonétiquement identiques celle qui a vraiment une signification.

3. a. Dans un spectrogramme, la grandeur représentée en abscisse est ici la fréquence et en ordonnée, il s'agit du temps.

b. La fréquence est en hertz (Hz) et le temps est en milliseconde (ms).

4.

Reconnaissance globale	navigation sur un serveur vocal au téléphone, apprentissage de langue étrangère, commande vocales dans les voitures, les téléphones ou bien encore dans les salles d'opérations chirurgicales, identification vocale dans les zones sécurisées ou bien dans le cadre d'une enquête judiciaire
Reconnaissance analytique	apprentissage de langue étrangère, dictée vocale (écriture en directe d'un texte dicté)

5. a. En comparant l'allure générale des différents mots, on identifie que le mot prononcé à la figure 3 est « envoyer ». À la figure 4, il s'agit du mot « annuler ».

b. La même personne a prononcé les mots des figures 1 et 4. Les fréquences atteignent des valeurs plus grandes que dans les autres figures. Il s'agit *a priori* d'une personne de sexe féminin. Du coup, les figures 2 et 3 ont *a priori* été prononcées par la même personne de sexe masculin.

6. La reconnaissance vocale fait appel à de nombreux autres domaines dont notamment : l'anatomie, la phonétique, le traitement du signal, la linguistique, l'intelligence artificielle et les statistiques.

7. Il reste toujours le problème de l'interprétation des phrases qui est nécessaire à leur bonne reconnaissance. Cette aptitude des programmes informatiques est du domaine de l'intelligence artificielle, technologie encore jeune et pas encore aboutie.

EXERCICES

COMPÉTENCE : Analyser des documents scientifiques

1. a. Le matériau susceptible de vibrer est les cordes vocales.

b. Le mécanisme capable de les faire vibrer est le souffle de l'air qui provient des poumons.

c. La caisse de résonance qui amplifie la vibration est formée par les cavités buccales et nasales.

2. Comme la voix d'une femme est plutôt aiguë et que la voix d'un homme plutôt grave, les cordes vocales chez les femmes sont plus petites que celles des hommes.

2. 1. Une courbe isosonique est une courbe qui correspond à un même niveau d'intensité sonore perçu par l'oreille.

2. La courbe isosonique du seuil d'audition descend plus bas aux hautes fréquences qu'aux basses, donc l'oreille humaine est plus sensible aux sons aigus.

3. D'après le graphique, le niveau d'intensité sonore réellement perçu est de 10 dB.

4.

f (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
A (dB)	-16,1	-8,6	-3,2	0	1	1,2

3. 1. Avec l'âge, un individu devient de moins en moins sensible aux sons aigus (le seuil auditif s'écroule aux hautes fréquences).

2. a. Une perte d'audition de 40 dB à 2 000 Hz correspond théoriquement à une oreille d'une personne de 90 ans.

b. La conséquence sur l'audition est une difficulté à suivre une conversation.

4 Pression acoustique ou puissance acoustique

Observer le document ci-dessus.

1. Quelle est la différence entre la pression acoustique et la puissance acoustique ?

La puissance acoustique est liée à la source sonore. La pression acoustique est ressentie au niveau du récepteur sonore.

2. a. De quoi dépend la pression acoustique ?

La pression acoustique dépend de la distance entre le récepteur et la source sonore.

b. Comment évolue la pression acoustique quand la distance augmente ?

Quand la distance entre la source sonore et le récepteur double, le niveau de pression acoustique est diminué de 6 dB.

5. 1. La plage de fréquences de 20 Hz à 20 kHz est importante car elle correspond à l'intervalle des sons audibles.

2. a. À chaque fréquence a été mesuré le niveau d'intensité sonore en dB.
 b. Les mesures ont été faites sur une plage de fréquences allant de 10 Hz à 25 000 Hz (environ).
 c. En toute rigueur, nous ne sommes pas en présence de *casques audio* haute fidélité car leur plage de transmission va plutôt de 100 Hz à 10 000 Hz.
 d. Le casque qui correspond à la courbe bleue transmettra mieux les basses fréquences (sons graves). Le casque qui correspond à la courbe rouge transmettra mieux les hautes fréquences (sons aigus).

6 1. D'après le diagramme d'émission du haut-parleur, le niveau d'intensité sonore mesuré à 1 m derrière le haut-parleur sur son axe principal est :

$$L = L_1 - 12,5 = 110 - 12,5 = 97,5 \text{ dB.}$$

2. a. D'après le diagramme d'émission du haut-parleur, le niveau d'intensité sonore mesuré à 1 m du haut-parleur dans une direction faisant un angle de 60° est :

$$L' = L_1 - 5,5 = 110 - 5,5 = 104,5 \text{ dB.}$$

b. On dit qu'un haut-parleur est directif car le niveau d'intensité sonore du son émis dépend de la direction.

7 1. D'après le document, le spectrogramme acoustique est construit en représentant en abscisse le temps et en ordonnée la fréquence des sons.

2. D'après le spectrogramme :

- le [s] est constitué des fréquences les plus élevées ;
- le [d] est constitué du moins de fréquences.

3. D'après le spectrogramme, il s'agit du [e].

COMPÉTENCE : Pratiquer une démarche expérimentale

8 1. a. Pour réaliser expérimentalement un tel enregistrement, il faut brancher un micro à un ordinateur disposant d'un logiciel de traitement du son.

b. La durée de l'enregistrement est de 4 000 ms.

2. Pour déterminer la fréquence du signal « zoom », on mesure la durée de plusieurs périodes pour en déduire la période T du signal et on en déduit la fréquence f sachant que $f = 1/T$.

3. Une analyse spectrale du signal a été effectuée.

4. Les pics de fréquence se situent plutôt entre 170 Hz à 250 Hz qu'entre 75 Hz et 140 Hz, donc la voix enregistrée est celle d'une femme.

9 1. a. La voix d'une personne est un son émis et donc peut se modéliser par un déplacement d'une perturbation (compression-dépression) dans l'air.

b. Le capteur adapté à la voix est le microphone.

2. a. Le signal électrique obtenu en sortie du capteur ne peut pas être traité informatiquement car c'est un signal analogique.

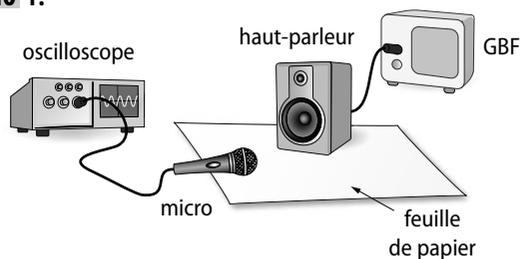
b. Pour qu'il le soit, il faut procéder à une conversion analogique-numérique.

c. Le signal électrique analogique (continu) est échantillonné (découpé) à une fréquence. Chacune des valeurs de tension retenue est ensuite quantifiée : elle est arrondie à la valeur de tension la plus proche, qui correspond à une valeur numérique associée à un nombre binaire.

3. a. Ce qui différencie un phonème d'un autre est l'amplitude du signal, mais surtout la fréquence.

b. Comme la fréquence est l'une des caractéristiques prédominantes des phonèmes, l'analyse spectrale de signaux de paroles peut permettre une reconnaissance vocale des phonèmes en comparant la fréquence d'un phonème prononcé et un ensemble de fréquences de phonèmes identifiés.

10 1.



La feuille de papier permet de tracer la ligne sur laquelle est créé le même niveau de signal en sortie du *micro* quand on y déplace le haut-parleur alimenté par un signal constant.

2. a. Lors de la réalisation de cette courbe, le microphone est placé au centre.

b. On indique une fréquence car un microphone a une bande passante et donc la courbe obtenue ne serait pas forcément la même à une autre fréquence du signal capté.
 c. Ce microphone est qualifié d'unidirectionnel car il n'a qu'une seule direction privilégiée pour capter le son.

Remarque : il existe des microphones qui ne sont pas unidirectionnels :



11 1. a. On mesure le niveau d'intensité sonore à l'aide d'un sonomètre.

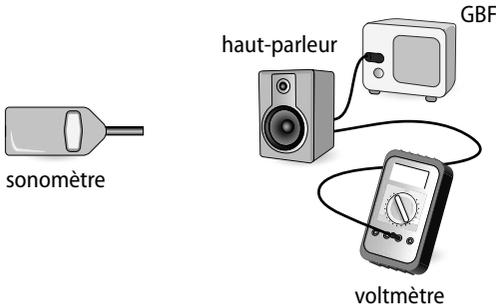
b. On mesure la fréquence du son émis par le haut-parleur en captant le son à l'aide d'un microphone relié soit à un oscilloscope, soit à un ordinateur disposant d'un logiciel de traitement du son.

2. a. On s'assure que l'amplitude de la tension qui alimente le haut-parleur reste constante pendant toute l'expérience en branchant par exemple un voltmètre ou un oscilloscope aux bornes du haut-parleur.

b. L'autre paramètre qui doit rester constant est la distance émetteur-capteur.

3. On ne peut pas parler lors des mesures pour ne pas perturber les mesures.

4.



12 1. Le sonomètre permet de mesurer un niveau d'intensité sonore.

2. Pour montrer que le niveau d'intensité acoustique dépend de la distance entre une source sonore et un récepteur, on alimente un haut-parleur par un GBF, avec une fréquence et une amplitude du signal adaptées. On place un sonomètre à une certaine distance du haut-parleur, puis on éloigne progressivement le sonomètre du haut-parleur. Pour une mesure plus précise, on utilise une règle graduée suffisamment grande.

3. a. L'évolution du niveau d'intensité acoustique en fonction de la distance n'est pas linéaire, puisque la courbe qui traduit cette évolution n'est pas une droite.
b. Le niveau d'intensité acoustique diminue avec la distance.
c. Le niveau d'intensité acoustique diminue de 6 dB lorsque la distance est doublée.

4. a. $I = P/S$, avec P , la puissance acoustique en W, et S , la surface en m^2 .

Le niveau d'intensité sonore L , en dB est :

$$L = 10 \log(I/I_0) \text{ donc } L = 10 \log(P/(4\pi \cdot I_0 \cdot d^2)).$$

b. Si la distance est doublée :

$$\Delta L = 10 \log(1/4) = -6 \text{ dB.}$$

13 1. a. Le son a besoin d'un milieu matériel pour se propager, cette propriété permet d'affirmer qu'un son est une onde mécanique et non une onde électromagnétique.

b. En enfermant une source sonore dans une cloche à vide, on n'entend plus le son quand on y fait le vide.

2. Pour montrer que le son a une fréquence de 1 860 Hz, on peut utiliser un microphone que l'on branche à un oscilloscope ou à un ordinateur équipé d'un logiciel de traitement du son.

3. a. $f = 1\,860 \text{ Hz}$ donc $T = 1/f = 5,38 \times 10^{-4} \text{ s}$.
 $v = \lambda/T$ donc $\lambda = v \cdot T = 340 \times 5,38 \times 10^{-4} = 18 \text{ cm}$.

b. La longueur d'onde d'un son représente la distance entre deux zones successives de compression ou de dépression.

c. Pour déterminer expérimentalement cette longueur d'onde, on utilise un microphone relié à un oscilloscope. On place l'oscilloscope à une certaine distance de la source sonore de telle sorte de capter un maximum de signal puis on éloigne le micro de cette source sonore jusqu'à obtenir à nouveau un maximum de signal. La distance entre deux maxima est égale à la longueur d'onde.

4. a. Pour vérifier le niveau d'intensité acoustique donnée par le fabricant, on place à 1 m de la source sonore un sonomètre.

b. $L_1 = 10 \cdot \log(I/I_0)$ donc $I_1 = 10^{(L_1/10)} \times I_0$
donc $I_1 = 10^{(16/10)} \times 1,00 \times 10^{-12} = 4,0 \times 10^{-11} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
 $I_1 = P_a/S_1$ donc $P_a = I_1 \cdot S_1 = I_1 \cdot 4\pi \cdot d_1^2$
Donc $P_a = 4,0 \times 10^{-11} \times 4\pi = 5,0 \text{ W}$.

c. On en déduit le rendement acoustique de la source :
 $\eta = P_a/P = 5,0/24,8 = 20 \%$.

5. Le seuil d'audibilité à 1 860 Hz correspond à un niveau d'intensité acoustique de 0 dB.

a. $L = 10 \cdot \log(I/I_0)$ donc $I = 10^{(L/10)} \times I_0$
si $L = 0$, $I = I_0$

$I = P_a/S$ avec P la puissance acoustique en W et S la surface en m^2 .

Pour une onde sphérique $S = 4\pi d^2$

donc $I = P_a/(4\pi d^2)$

donc $d^2 = P_a/(4\pi I)$

donc $d_0^2 = P_a/(4\pi I_0) = 5,0/(4\pi \times 1,00 \times 10^{-12})$

donc $d_0 = 630 \text{ km}$.

b. En réalisant l'expérience, on remarque qu'en réalité cette valeur est beaucoup plus faible car le signal s'atténue en se propageant et en rencontrant des obstacles.

COMPÉTENCE : Résoudre des problèmes scientifiques

14 1. En regard à la réglementation en vigueur, si les techniciens assurant la maintenance dans l'atelier sont susceptibles de s'approcher jusqu'à 2 m des machines pour les arrêter, l'obligation de l'employeur est de leur faire porter des protecteurs individuels car le niveau d'intensité sonore y est supérieur à 90 dB.

2. La barrière de protection doit être placée à 2 m de la porte d'entrée, car dans cette zone le niveau d'intensité sonore est inférieur à 90 dB.

15 1. Lorsqu'un élève intervient durant le cours, le niveau sonore reçu par le professeur est $L_1 = 60 \text{ dB}$.

$L_1 = 10 \log(I/I_0)$ donc $I_1 = 10^{L_1/10} \cdot I_0$

$I_4 = 4 I_1 = 4 \times 10^{L_1/10} \times I_0$

donc $I_4 = 4 \times 10^{(60/10)} \times 1,00 \times 10^{-12}$
 $= 4 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

$$L_4 = 10 \log(I_4/I_0)$$

donc $L_4 = 10 \log(4 \times 10^{-6}/(1,00 \times 10^{-12})) = 66 \text{ dB}$.

2. $I = P/S$, avec P , la puissance acoustique en W, et S , la surface en m^2 .

Pour une onde sphérique, $S = 4\pi d^2$ donc $I = P/(4\pi d^2)$.

$$I_{\text{loin}} = P/(4\pi d_{\text{loin}}^2) \quad \text{et} \quad I_{\text{près}} = P/(4\pi d_{\text{près}}^2)$$

$$d_{\text{près}} = d_{\text{loin}}/3 \quad \text{donc} \quad I_{\text{près}} = 9 P/(4\pi d_{\text{loin}}^2) = 9 I_{\text{loin}}$$

Niveau d'intensité sonore L , en dB :

$$L_{\text{près}} = 10 \log(I_{\text{près}}/I_0) = 10 \log(9 I_{\text{loin}}/I_0) \quad \text{donc} :$$

$$L_{\text{près}} = 10 \log(9 \times 3,16 \times 10^{-8}/(1,00 \times 10^{-12})) = 55 \text{ dB}.$$

16 1. $L_1 = 10 \cdot \log(I/I_0)$ donc $I_1 = 10^{(L_1/10)} \times I_0$
donc $I_1 = 10^{(35/10)} \times 1,00 \times 10^{-12} = 3,2 \times 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

2. a. $I = P/S$ avec P la puissance acoustique en W et S la surface en m^2 .

Pour une onde sphérique $S = 4\pi d^2$

$$\text{donc} \quad I = P/(4\pi d^2)$$

$$I_1 = P/(4\pi d_1^2)$$

$$I_2 = P/(4\pi d_2^2)$$

$$d_2 = 2 \cdot d_1 \quad \text{donc} \quad I_2 = P/(4\pi d_1^2) \cdot 4 = I_1/4$$

$$\text{donc} \quad I_2 = 8,0 \times 10^{-11} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Niveau d'intensité sonore L en dB :

$$L_2 = 10 \times \log(I_2/I_0) = 10 \times \log(8,0 \times 10^{-11}/1,00 \times 10^{-12}) = 19 \text{ dB}.$$

b. On en déduit l'affaiblissement phonique :

$$\text{Aff} = L_2 - L_1 = 16 \text{ dB}.$$

3. $I_1 = P/(4\pi d_1^2)$ donc :

$$P = I_1 \cdot 4\pi \cdot d_1^2 = 3,2 \times 10^{-10} \times 4\pi = 4,0 \times 10^{-9} \text{ W}.$$

Niveau de puissance sonore L en dB :

$$L_W = 10 \cdot \log(P/P_0) \quad \text{avec} \quad P_0 = 1,00 \times 10^{-12} \text{ W}.$$

$$\text{Donc} \quad L_W = 10 \cdot \log(4,0 \times 10^{-9}/(1,00 \times 10^{-12})) = 36 \text{ dB}.$$

4. On intègre ces pondérations pour évaluer le niveau d'intensité sonore effectivement perçu par l'oreille.

5. et 6.

Fréquence (Hz)	125	250	500	1 000	2 000
L en dB (A)	26,9	36,4	47,8	39	32
I en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ $= 10^{(W/10)} \times 1,00 \times 10^{-12}$	$4,90 \times 10^{-10}$	$4,36 \times 10^{-9}$	$6,03 \times 10^{-8}$	$7,94 \times 10^{-9}$	$1,58 \times 10^{-9}$

$$I_t = \Sigma I = 7,47 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

$$L_t = 10 \times \log(I_t/I_0) = 10 \times \log(7,47 \times 10^{-8}/(1,00 \times 10^{-12})) = 49 \text{ dB} < 50 \text{ dB}.$$

Nathan ne gêne donc pas ses voisins.

17 1. a. $L = 10 \times \log(I/I_0)$ avec $I_0 = 1,00 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
donc $I = 10^{(L/10)} \times I_0 = 10^{(90/10)} \times 1,00 \times 10^{-12}$
 $= 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

$$I = \frac{P}{S} = \frac{1}{p \cdot v} p^2 \quad \text{donc} \quad p^2 = p \cdot v \cdot I = 1,2 \times 340 \times 10^{-3}.$$

$$\text{Donc} \quad p = 0,64 \text{ Pa}.$$

b. Comme la sensibilité du microphone est de $18 \text{ mV} \cdot \text{Pa}^{-1}$, la valeur de la tension délivrée par ce microphone est $18 \times 0,64 = 11,5 \text{ mV}$.

2. $I = \frac{P}{S} = \frac{1}{p \cdot v} p^2$ donc :

$$I_5 = 1^2/(1,2 \times 340) = 2,4 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

$$S/B = 10 \times \log(P_S/P_B) = 10 \times \log(I_S/I_B).$$

$$\text{Donc} \quad I_B = I_S/10^{S/B/10} = 2,4 \times 10^{-3}/10^{7,1} = 1,9 \times 10^{-9} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

$$L_B = 10 \times \log(I_B/I_0) = 10 \times \log(I_B/(1,00 \times 10^{-12})).$$

$$\text{Donc} \quad L_B = 10 \cdot \log(1,9 \times 10^{-9}/(1,00 \times 10^{-12})) = 33 \text{ dB}.$$

18 Un sonomètre reçoit les émissions sonores provenant de deux sources distinctes (S_1) et (S_2).

Lorsque (S_1) fonctionne seule, le niveau sonore mesuré est $L_1 = 70 \text{ dB}$. Lorsque (S_2) fonctionne seule le niveau sonore mesuré est $L_2 = 60 \text{ dB}$.

1. a. $L = 10 \cdot \log(I/I_0)$ donc $I = 10^{(L/10)} \times I_0$

$$I_1 = 10^{(L_1/10)} \times I_0 = 10^{(70/10)} \times 1,00 \times 10^{-12}$$

$$= 1,00 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

$$I_2 = 10^{(L_2/10)} \times I_0 = 10^{(60/10)} \times 1,00 \times 10^{-12}$$

$$= 1,00 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

b. $I_t = I_1 + I_2$

donc

$$N_t = 10 \cdot \log(I_t/I_0)$$

$$= 10 \cdot \log((1,00 \times 10^{-5} + 1,00 \times 10^{-6})/(1,00 \times 10^{-12}))$$

$$= 70,4 \text{ dB}.$$

2. $I = P/S$ avec P la puissance acoustique en W et S la surface en m^2 .

Pour une onde sphérique $S = 4\pi d^2$

$$\text{donc} \quad I = P/(4\pi d^2).$$

Niveau d'intensité sonore N en dB :

$$L = 10 \cdot \log(I/I_0)$$

$$\text{donc} \quad L = 10 \cdot \log(P/(4\pi \cdot I_0 \cdot d^2)).$$

Au départ $L_1 = 10 \cdot \log(P_1/(4\pi \cdot I_0 \cdot d^2))$

$$\text{donc} \quad P_1 = 10^{(L_1/10)} \cdot 4\pi \cdot I_0 \cdot d^2$$

$$= 10^{(70/10)} \times 4\pi \times 1,00 \times 10^{-12} = 4\pi \times 10^{-5} \text{ W}.$$

Au final $L_1 = L_2 = 10 \cdot \log(P_1/(4\pi \cdot I_0 \cdot (d+x)^2))$

$$\text{donc} \quad P_1/(4\pi \cdot I_0 \cdot (d+x)^2) = 10^{(N_2/10)}$$

$$\text{donc} \quad (d+x)^2 = P_1/(4\pi I_0) \cdot 10^{(N_2/10)}$$

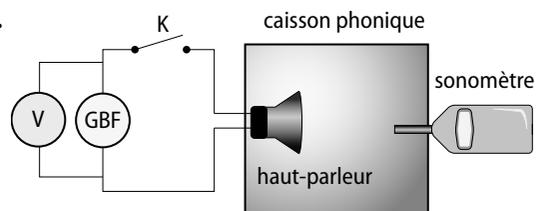
$$\text{donc} \quad (1+x)^2 = 10^{-5}/(10^{-12} \cdot 10^{(60/10)}) = 10$$

$$\text{donc} \quad 1+x = 3,16 \quad \text{et} \quad x = 2,16 \text{ m}.$$

ÉVALUATION DES COMPÉTENCES EXPÉRIMENTALES

Mesure de la bande passante d'un haut-parleur

1.



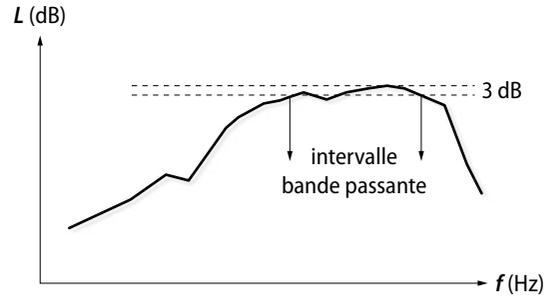
3.

f (Hz)	100	200	300	400	500	600	700	800	900
L (dB)	62	70	70	69	72	75	79	80	79

f (Hz)	1 000	1 200	1 500	2 000	2 500	3 000	3 500	4 000	4 500
L (dB)	80	78	86	82	85	82	88	84	82

f (Hz)	5 000	5 500	6 000	8 000	9 000	10 000	12 000	15 000	20 000
L (dB)	86	89	80	85	58	58	60	63	58

4. et 5. a.



b. L'intervalle [1 300 ; 6 000] correspondant à la bande passante du haut-parleur.

1 Tableau de l'activité 4, question 7.a

f (Hz)	40	50	80	100	200	500	800	1 000	2 000	5 000	8 000	10 000	15 000
L_{twitter} (dB)	55	56	57	58,5	58,1	75,8	75,3	85,8	85,8	95,4	87	87,8	75,7
L_{woofer} (dB)	78	80,7	82,9	80,5	87,3	94,6	101	94	101	82,8	70	80	60

Son et architecture

Le programme

THÈME 2 : Son et musique

Domaines d'étude	Mots-clés
- Son et architecture.	- Auditorium ; salle sourde. - Isolation phonique ; acoustique active ; réverbération.

Les liens avec l'enseignement spécifique

- Atténuation.
- Niveau d'intensité sonore.
- Propriétés des ondes ; interférences.

Évaluation diagnostique

p. 106

SITUATION 1

Cette première situation a pour but d'introduire la notion d'*isolation phonique*. Les élèves pourront s'interroger sur le rôle de parois simples et sur le matériau utilisé. Ils pourront valider ou invalider leurs hypothèses dans les expériences de l'**activité 1**.

SITUATION 2

Cette situation permet aux élèves de s'interroger sur les formes particulières utilisées dans une salle sourde pour éviter les échos.

L'**activité 1** a permis d'introduire la notion de réflexion des ondes sonores, l'**activité 2** permettra de comprendre le principe de la salle sourde.

L'**activité 3** mettra en évidence cette propriété.

SITUATION 3

Contrairement à une idée reçue, plus les matériaux sont denses, plus ils sont de bons *isolants phoniques*. Il convient de ne pas confondre isolant phonique (ou acoustique) et isolant thermique.

L'**activité 3** mettra en évidence cette propriété.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

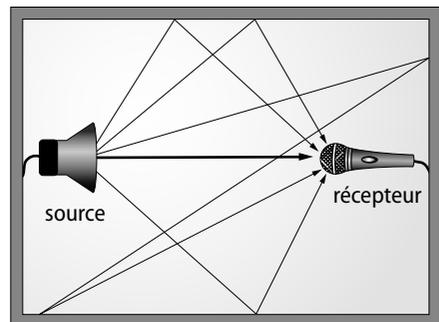
Comment contrôler la réverbération d'une salle ?

p. 108

1. Les parois de la maquette représentent les murs ; la source l'émetteur sonore ; le récepteur est une personne.

2. a. Voici quelques représentations possibles des trajets entre l'onde sonore (rayon sonore) et le récepteur. Les angles ne respectent pas $i = r$ (traité question **9.b**).

b. Le trajet le plus direct entre la source et le récepteur est celui indiqué par la flèche en trait épais. Retard de propagation pour les autres rayons sonores.



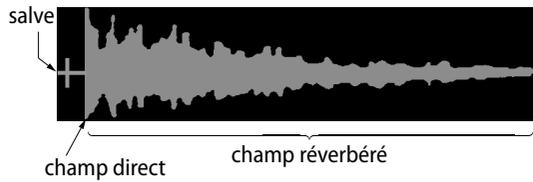
3. Le champ direct est le faisceau de rayons sonores qui provient de la source et qui arrive au récepteur sans réflexion sur les parois. Un des rayons de ce faisceau est le rayon en trait épais.

4. L'intérêt est de conserver le même ordre de grandeur entre les dimensions des longueurs d'onde et de la salle. Pour l'onde ultrasonore, l'ordre de grandeur est 10^{-2} m et les dimensions de la boîte sont 10^{-1} m.

C'est un rapport 10^1 . Dans une salle de spectacle le rapport est le même :

$$10^1/10^0 = 10^1.$$

5.



6. Pour $i = r$, l'amplitude est maximale.

7. La mousse acoustique est la surface qui permet la plus grande atténuation du champ réverbéré.

8. L'amplitude du champ réverbéré diminue.



9. a. $i = r$.

b. Reprendre la question 2 mais avec $i = r$ pour chaque réflexion sur les parois.

10. Absorption de l'onde sonore.

11. a. Parois planes : plus grande réflexion.

b. Il y a diminution du champ réverbéré, le papier d'aluminium agit comme une paroi diffusante (petites réflexions).

c. Il y a diminution du champ réverbéré, la moquette « absorbe » l'onde sonore. Le rapport entre l'ordre de grandeur de la longueur d'onde et des « cavités » de la moquette est 10^{-1} . Ce sont des diffractions qui s'effectuent à la surface de la moquette et qui dissipent l'onde sonore.

d. La mousse acoustique assure le rôle de panneau diffusant et absorbant (diffractant).

12. a. Les réflexions des rayons sonores sur les parois.

b. Panneaux absorbants et diffusants.

ACTIVITÉ 2

Les chambres sourdes

p. 110

1. (Doc. 1) Pour obtenir un écho bien audible, il faut se trouver dans un espace dégagé devant une série d'obstacles (montagnes ou falaises par exemple).

2. a. (Doc. 2) Un écho est le nom donné à la réflexion des ondes sonores sur un obstacle.

b. (Doc. 2) Au niveau microscopique, l'écho correspond au changement de direction subit par les molécules présentes dans l'air lorsqu'elles rencontrent un obstacle qui empêche leur mouvement.

3. a. (Doc. 2 et 3) Une onde sonore réfléchie – correspondant à l'écho – peut avoir une amplitude plus faible que celle de l'onde incidente.

b. (Doc. 2 et 3) Cette diminution d'amplitude s'explique par une absorption partielle de l'énergie transportée par l'onde.

4. (Doc. 4) Un écho est une onde sonore qui subit plusieurs réflexions successives sur différents obstacles. Le son est perceptible pendant la durée de cette propagation.

5. a. (Doc. 4) La durée d'un écho est appelée temps de réverbération.

b. (Doc. 4) Plus le temps de réverbération est élevé, plus la salle paraît bruyante. On parle ainsi d'une salle « sonore » ou d'une salle « qui résonne ». Inversement, un temps de réverbération court donne une impression de son « étouffé ».

6. a. (Doc. 6) Dans une salle sourde, afin de réduire le temps de réverbération, les parois sont recouvertes de matériaux absorbants qui atténuent totalement l'amplitude de l'onde réfléchie.

b. (Doc. 6) Les matériaux utilisés forment une structure de géométrie particulière qui garantit qu'une onde réfléchie après une première réflexion soit interceptée par une surface en regard.

7. a. Une salle sourde ne permet pas à une onde sonore, rencontrant une de ses parois, d'être réfléchie en direction de l'intérieur de la salle.

b. Le mot « anéchoïque » est utilisé pour qualifier ces salles car elles ne peuvent être le siège d'aucun écho.

ACTIVITÉ 3

Choisir un matériau pour une cloison

p. 112

1. Le niveau acoustique s'exprime en décibel (dB).

2. a. D'après la figure 2, le niveau acoustique d'un téléviseur vaut 65 dB et celui souhaitable pour une chambre à coucher vaut 15 dB.

b. Il faudra que la cloison « réduise » le niveau acoustique de 50 dB.

3. D'après la définition : $R = 65 - 15 = 50$ dB.

4. Matériel nécessaire à la production d'un son de fréquence donnée : GBF, haut-parleur, fils de connexion et fréquencesmètre (si le GBF n'en est pas pourvu).

5. a. La valeur mesurée par le sonomètre dépend de l'amplitude du signal, de la fréquence du signal, de la distance entre le haut-parleur et la source, de l'alignement des axes sonomètre et du haut-parleur, de l'environnement (bruit de la classe).

b. Pour obtenir la valeur expérimentale de R , il est nécessaire de mesurer le niveau acoustique avec, puis

sans le carreau de plâtre. La distance sonomètre/haut-parleur doit être maintenue constante.

c. Régler le signal délivré par le GBF avec l'amplitude et la fréquence indiquée par le professeur. Relier le GBF au haut-parleur. Fixer le sonomètre sur un support à une distance fixe du haut-parleur. L'ensemble des paramètres, cités à la question 5.a, doit être maintenu constant tout au long de l'expérience.

6. $L_1 = 63$ dB et $L_2 = 31$ dB (valeurs indicatives en fonction des conditions et du matériel).

7. a. La valeur de l'affaiblissement vaut :

$$R = L_1 - L_2 = 32 \text{ dB.}$$

b. Cette valeur est inférieure à celle souhaitée (question 3).

8. Au-delà de 400 Hz, on constate que la valeur de l'affaiblissement R augmente quand la valeur de la fréquence f augmente.

9. La nouvelle valeur de l'affaiblissement vaut $R' = L'_1 - L'_2 = 82 - 28 = 54$ dB (valeurs indicatives en fonction des conditions et du matériel).

10. La relation indiquée est cohérente avec une augmentation de la valeur de R en fonction de la fréquence f .

11. a. La définition de la masse volumique s'écrit :

$$\mu = \frac{m}{V} = \frac{12,0}{10,0 \times 50,0 \times 66,0 \times 10^{-6}} = 3,64 \times 10^2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}.$$

b. $R = 20 \cdot \log(f \cdot \mu \cdot e) - 45$

$$\Rightarrow \log(f \cdot \mu \cdot e) = \frac{R + 45}{20} \Rightarrow e = \frac{1}{f \cdot \mu} \cdot 10^{\frac{R + 45}{20}}$$

$$\text{A.N. : } e = \frac{1}{500 \times 3,64 \times 10^2} \times 10^{\frac{50 + 45}{20}} = 31 \text{ cm pour une}$$

fréquence de 500 Hz.

c. Cette valeur est trop importante pour une cloison.

12. Ces cloisons permettent d'atteindre des valeurs plus importantes d'affaiblissement avec une épaisseur plus faible.

ACTIVITÉ 4

Contrôle actif du bruit

p. 114

1. a. Le contrôle passif tend à limiter la nuisance par un amortissement mécanique (matériaux). Le contrôle actif tend à limiter la nuisance par une analyse électronique du signal.

b. Parois diffusantes et/ou absorbantes du bruit.

2. a. Un contre-bruit est un signal qui s'ajoute au bruit afin de l'atténuer.

b. Par des interférences destructives.

c. Les basses fréquences (centaine d'hertz).

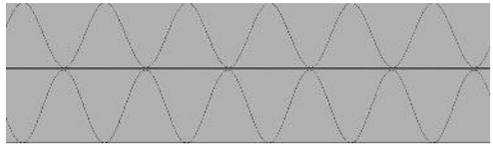
3. a. 400 Hz.

b. Le signal doit être en opposition de phase avec le bruit.

4. « inverser » ou « inverser sens ».

5. Une diminution de l'intensité sonore suivant l'éloignement ou l'approche d'un des haut-parleurs.

6.



7. Par interférences destructives.

ACTIVITÉ 5

Temps de réverbération

p. 116

1. a. Le temps de réverbération est la durée nécessaire pour que le niveau sonore soit atténué de 60 dB.

b. Trop grand : « cacophonie », ambiance cathédrale. Trop petit : ambiance trop feutrée.

c. Oui, document 6.

2. a. Les matériaux utilisés pour les parois (aire d'absorption équivalente) et le volume du local.

b. Le coefficient d'absorption acoustique.

3. a. $\alpha = 1$; b. $\alpha = 0$.

4. a. Aire d'absorption équivalente :

$$A = 12 \times 0,93 + 62 \times 0,030 + 20 \times 0,45 = 22 \text{ m}^2.$$

Avant traitement : $A = 94,0 \times 0,020 = 1,9 \text{ m}^2$.

b. Avant traitement : $T_{160} = (0,16 \times 60)/1,88 = 5,1 \text{ s}$.

Après traitement : $T_{160} = (0,16 \times 60)/22 = 0,43 \text{ s}$.

5. La présence de meubles influence le temps de réverbération.

6. Les matériaux des parois et le volume du local.

7. Ce sont des matériaux fibreux (ils absorbent l'énergie de l'onde).

EXERCICES

COMPÉTENCE : Analyser des documents scientifiques

1. a. Les traits pleins représentent la propagation du son en ligne droite dans un milieu homogène. Les traits en pointillés représentent la propagation des ondes réfléchies.

b. Les traits en pointillés ont été construits à partir des traits pleins de façon à ce que l'angle d'incidence (entre un trait plein et la normale à la surface rencontrée) et l'angle réfléchi (entre un trait en pointillé et la normale à la surface rencontrée) soient égaux.

2. Au niveau de la durée de propagation du son, l'intérêt de l'orientation du plafond en arrière de l'auditorium

permet de réduire le temps de propagation des sons réfléchis pour les personnes assises au fond de la salle.

2 Ingénieur design en acoustique

Un ingénieur design en acoustique consulte les architectes de l'art et les directeurs techniques de cinémas et de théâtres pour s'assurer d'une acoustique optimale de cinémas et de théâtres. Il utilise des logiciels sophistiqués de modèles acoustiques pour prédire et analyser réverbération, réflexion, vibration et tout ce qui concerne l'acoustique dans un cinéma et dans un théâtre. Pour les cinémas et les théâtres déjà construits, il utilise des techniques de mesures acoustiques et prédit le modèle pour évaluer les potentielles solutions aux problèmes acoustiques. Isoler cinémas et théâtres de bruits perturbateurs non souhaités est juste vital. Un ingénieur design en acoustique est aussi engagé pour empêcher bruits et vibrations provenant des espaces adjacents, des systèmes mécaniques, et de l'environnement extérieur qui pourraient affecter défavorablement l'acoustique du cinéma et du théâtre. Il s'assure que les systèmes utilisés s'intègrent simplement en synergie avec l'acoustique du cinéma et du théâtre.

1. Quels sont les différents phénomènes acoustiques qui existent dans un cinéma ou un théâtre ?

Les différents phénomènes acoustiques sont la réverbération, la réflexion ou la vibration.

2. Comment un ingénieur design en acoustique peut-il prédire ces phénomènes ?

Il utilise des logiciels de simulation qui permettent de modéliser l'acoustique du cinéma ou du théâtre.

3. Pourquoi l'isolation d'un cinéma ou d'un théâtre est-elle importante ?

L'isolation acoustique permet de les protéger des bruits extérieurs et aussi d'empêcher les sons produits à l'intérieur de se propager à l'extérieur.

4. Quelles sont les difficultés pour les cinémas ou les théâtres déjà construits ?

Les difficultés avec les cinémas et les théâtres déjà construits est qu'il faut partir de l'existant et intégrer des systèmes (comme l'acoustique active) qui améliorent l'acoustique tout en s'intégrant dans l'existant.

3 1. Les surfaces vitrées du mur représentent 10 % de la surface totale de celle-ci :

$$S = 2,50 \times 6 = 15 \text{ m}^2$$

donc $S_v = 0,10 \times 15 = 1,5 \text{ m}^2$.

On estime que seule la paroi en contact avec l'extérieur transmet le bruit routier.

$$S_m = S - S_v = 15 - 1,5 = 13,5 \text{ m}^2.$$

2. a. L'indice d'affaiblissement R semble dépendre de :

- du matériau du mur ;
- de son épaisseur ;
- du système constructif dans lequel il est réalisé.

b. L'affaiblissement face aux bruits routiers est égal à la somme de l'indice d'affaiblissement pondéré et du terme de correction de bruit routier.

Une surface vitrée est réalisée par un double vitrage acoustique 10(12)4.

Donc d'après le document 2 :

$$R_v = 35 + (-3) = 32 \text{ dB}.$$

Le mur considéré est en brique creuse, d'épaisseur 20 cm, recouvert, à l'intérieur, de plaques de polystyrène de 8 cm.

Donc d'après le document 3 : $R_m = 41 \text{ dB}$.

c. $R = 10 \log (1/\tau)$ donc $\tau = 1/10^{(R/10)}$

$$\text{donc } \tau_v = 1/10^{(R_v/10)} = 1/10^{(32/10)} = 6,3 \times 10^{-4}$$

$$\text{et } \tau_m = 1/10^{(R_m/10)} = 1/10^{(41/10)} = 7,9 \times 10^{-5}.$$

3. a. $\tau_g = (\tau_v \cdot S_v + \tau_m \cdot S_m) / (S_v + S_m)$ donc :

$$\tau_g = (6,3 \times 10^{-4} \times 1,5 + 7,9 \times 10^{-5} \times 13,5) / (1,5 + 13,5) = 1,3 \times 10^{-4}.$$

$$R_g = 10 \log (1/\tau_g)$$

$$\text{donc } R_g = 10 \times \log (1/1,3 \times 10^{-4}) = 39 \text{ dB}.$$

b. Cette isolation phonique est satisfaisante car $83 - 39 < 45 \text{ dB}$: la chambre est qualifiée d'« assez calme ».

4 1. Le local groupes électrogènes comporte deux groupes diesel alternateur. Chaque groupe diesel alternateur émet un niveau sonore L_g égale à 95 dB.

$$L_g = 10 \log (I_g/I_0) \text{ donc } I_g = 10^{(L_g/10)} \times I_0.$$

$$I_t = 2 \times 10^{(N_g/10)} \times I_0$$

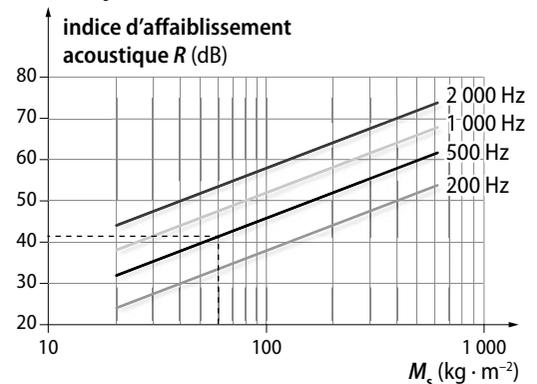
$$\text{donc } L_t = 10 \log (I_t/I_0) = 10 \log (2 \times 10^{(L_g/10)}) = 98 \text{ dB}.$$

2. Le cahier des charges impose un niveau sonore dans la salle PC machine inférieur à 57 dB.

$R = L_i - L_t$ où L_t niveau d'intensité transmise et L_i niveau d'intensité incidente, donc :

$$R = 98 - 57 = 41 \text{ dB}.$$

3. La fréquence moyenne mesurée est égale à 500 Hz. Avec le document fourni, on détermine la masse surfacique M_s de la cloison isolante.



$$M_s = 60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}.$$

4. On en déduit l'épaisseur e de la cloison :
 $\rho_c = M_s/e$ donc $e = M_s/\rho_c = 60/200 = 0,30 \text{ m} = 30 \text{ cm}$.

COMPÉTENCE : Pratiquer une démarche expérimentale

5 1. a. L'angle i représente l'angle d'incidence : l'angle entre la normale à l'obstacle et la droite qui modélise la propagation de l'onde entre l'émetteur et l'obstacle. L'angle i' représente l'angle réfracté : l'angle entre la normale à l'obstacle et la droite qui modélise la propagation de l'onde entre l'obstacle et le récepteur.

b. $i = i'$.

c. Cette relation ne dépend pas du matériau utilisé comme obstacle.

2. Suivant la nature du matériau utilisé pour l'obstacle, l'amplitude du signal détecté au niveau du récepteur est plus faible car une partie du signal transmis et/ou une partie du signal est absorbé.

6 A. 1. a. Le GBF branché ainsi à un haut-parleur permet de choisir une fréquence et une amplitude pour le signal électrique alimentant le haut-parleur.

b. Le microphone branché ainsi à un oscilloscope peut permettre de mesurer la fréquence et l'amplitude du signal reçu.

2. On intercale entre le haut-parleur et le microphone un matériau. Au niveau du signal observé à l'oscilloscope :
 – la fréquence du signal reste inchangée ;
 – l'amplitude du signal diminue.

B. 1. a. Le sonomètre mesure le niveau d'intensité sonore.

b. Le « caisson phonique » permet de s'affranchir des bruits extérieurs.

2. Dans ce montage, les paramètres qu'il est possible de modifier sont :

- la nature du matériau utilisé et éventuellement son épaisseur et sa forme ;
- la fréquence et l'amplitude du signal alimentant le haut-parleur.

7 1. a. L'indice d'affaiblissement provoqué par cette paroi est :

$$R = 10 \log (1/\tau) = 10 \log (1/(2,0 \times 10^{-3})) = 27 \text{ dB}.$$

b. $R = L_i - L_t$ donc $L_t = L_i - R = 70 - 27 = 43 \text{ dB}$.

2. a. $R = 10 \log (1/\tau)$
 $= 10 \log (1/(1,0 \times 10^{-3}))$
 $= 30 \text{ dB}.$

$R = L_i - L_t$ donc $L_t = L_i - R = 70 - 30 = 40 \text{ dB}.$

b. On ne mesure donc pas au sonomètre un niveau d'intensité acoustique deux fois plus faible au niveau de la face de sortie.

8 1. $v = D/\tau$ donc $\tau = D/v$
 donc $\tau = 68 \times 10^{-2}/340$
 $= 6,8 \times 10^{-1}/(3,40 \times 10^2) = 2,0 \times 10^{-3}$
 $= 2,0 \text{ ms}.$

2. C'est dans l'expérience 3 qu'il y a moins d'écho : cela s'explique par l'absence de couvercle.

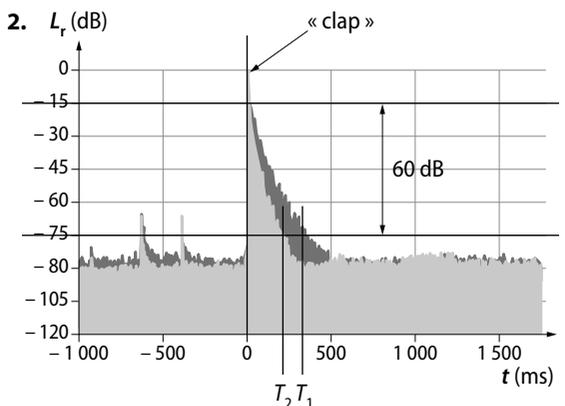
C'est dans l'expérience 2 qu'il y a un meilleur amortissement de l'écho : cela s'explique par la présence de moquette qui absorbe le son.

3. L'expérience 3 est la plus intéressante d'un point de vue acoustique et montre qu'en l'absence de plafond, l'acoustique est meilleure puisqu'on diminue le phénomène d'écho.

4. Le plafond des salles de concert est recouvert de dalles alvéolées car celles-ci absorbent/diffusent le son et réduisent par la même le phénomène d'écho.

9 1. a. Les grandeurs représentées sont le niveau d'intensité acoustique (en dB) et le temps (en seconde).

b. Le point origine de coordonnées (0 ; 0) correspond à l'intensité acoustique maximale mesurée lors du « clap » à l'instant où celui-ci est produit.



a. En absence de mousse acoustique, le temps de réverbération est $T_1 = 330 \text{ ms}$.

b. En présence de mousse acoustique, le temps de réverbération est $T_2 = 180 \text{ ms}$.

3. a. Avant le « clap », le microphone enregistre le bruit de fond.

b. La courbe rose étant légèrement au-dessus de la courbe verte, la mousse acoustique semble atténuer le bruit de fond.

10 1. Pour réaliser cette étude expérimentale, il faut disposer d'un GBF permettant de faire varier la fréquence d'un signal électrique, d'un voltmètre ou d'un oscilloscope pour s'assurer que l'amplitude du signal soit constant quelques soient les fréquences, d'un haut-parleur comme émetteur sonore (à disposer au milieu de la salle) et d'un microphone relié à un logiciel d'ac-

quisition permettant de mesurer le niveau d'intensité sonore en fonction du temps.

Le temps de réverbération T en seconde est la durée nécessaire à l'affaiblissement de 60 dB du niveau d'intensité sonore d'une source après son extinction. On mesure donc la durée à cet affaiblissement.

2. Les résultats de cette étude montrent que le temps de réverbération dépend de la fréquence.

3. Que la salle soit occupée ou non a une conséquence sur les mesures effectuées puisque les objets ou les individus présents dans une salle absorbent une partie du son.

4. Le cadre législatif est respecté puisque $T < 1,2$ s autour de 500, 1 000 et 2 000 Hz.

COMPÉTENCE : Résoudre des problèmes scientifiques

11 1. L'intérêt d'une telle structure est de permettre de démultiplier les réflexions des ondes sonores, en les localisant au niveau de la surface.

2. La propriété de cette mousse est qu'elle doit être très absorbante au niveau phonique.

12 A. 1. La source émet avec une puissance acoustique $P = 1,00$ W.

$I = P/S$ avec P puissance acoustique en W et S surface en m^2 .

Pour une onde sphérique $S = 4\pi d^2$ avec d distance entre la source et le récepteur.

Donc $I = P/(4\pi d^2) = 1,00/(4\pi \times 5^2) = 3,18 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

$L = 10 \log(I/I_0) = 10 \log(3,18 \times 10^{-3}/(1,00 \times 10^{-12})) = 85$ dB.

2. En réalité, on mesure à cet endroit un niveau d'intensité sonore $L = 97$ dB. Cela peut s'expliquer par l'existence de réflexions du son dans la salle ou de la présence d'une acoustique active qui permet de modifier l'acoustique de la salle.

B. On s'intéresse au mur de séparation entre l'auditorium et les loges.

Au voisinage de ce mur, du côté de l'auditorium, on mesure un niveau d'intensité sonore $L_1 = 92,0$ dB.

1. On appelle L_2 le niveau d'intensité sonore au voisinage du même mur du côté des loges.

L'expression de l'indice d'affaiblissement acoustique R est donc $R = L_1 - L_2$.

2. Les matériaux utilisés pour construire le mur sont caractérisés par un coefficient de transmission de la paroi : $\tau = 8,50 \times 10^{-4}$.

$R = 10 \log(1/\tau) = 10 \log(1/(8,50 \times 10^{-4})) = 30,7$ dB.

3. $R = L_1 - L_2$
donc $L_2 = L_1 - R = 92,0 - 30,7 = 61,3$ dB.

4. Une technique possible pour abaisser la valeur de L_2 est d'utiliser des matériaux isolant comme des mousses acoustiques.

13 1. $L = 10 \log(I/I_0)$ donc $I = 10^{(L/10)} \times I_0$

Si plusieurs sources $I = \sum I_n$.

$$L_{\text{tot}} = 10 \log(10^{(L1/10)} + 10^{(L2/10)} + 10^{(L3/10)} + 10^{(L4/10)} + 10^{(L5/10)} + 10^{(L6/10)})$$

$$L_{\text{tot}} = 10 \cdot \log(10^{(83,0/10)} + 10^{(82,0/10)} + 10^{(80,3/10)} + 10^{(81,7/10)} + 10^{(81,0/10)} + 10^{(77,5/10)}) = 89,0 \text{ dB.}$$

2. a. $\sigma = \rho \cdot e$ donc $\sigma = 48 \times 0,125 = 6,0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$.

b. D'après la loi de masse : $R = 20 \log(f \cdot \sigma) - 45$ avec f fréquence en Hz et σ masse surfacique en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ donc à 1 000 Hz, $R = 20 \log(1\,000 \times 6,0) - 45 = 30,5$ dB.

c. $R = L_i - L_t$ où L_t niveau d'intensité transmise et L_i niveau d'intensité incidente.

Donc $L_t = L - R = 81,7 - 30,5 = 51,2$ dB.

d. $51,2 < 60$, donc le mur satisfait au critère d'isolation phonique requis.

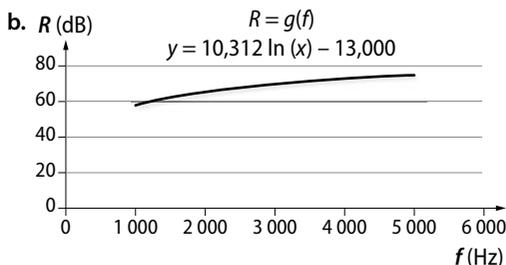
ÉVALUATION DES COMPÉTENCES EXPÉRIMENTALES

Matériau isolant et loi de masse p. 123

Les résultats sont donnés pour un matériau en béton d'épaisseur 14 cm et de masse surfacique de $300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$.

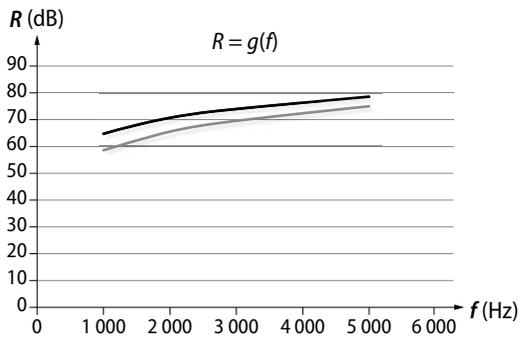
3. a. Pour un matériau en béton d'épaisseur 14 cm et de masse surfacique de $300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$.

Fréquence (kHz)	1	1,2	1,6	2	2,5	3,2	4	5
R (dB)	58	60	63	66	68	70	72	75



4. a. La loi de masse avance que $R = 20 \log(f \cdot \sigma) - 45$ avec f fréquence en Hz et σ masse surfacique en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$.

	A	B	C
1	1000	58	64,5424251
2	1200	60	66,12605
3	1600	63	68,6248247
4	2000	66	70,563025
5	2500	68	72,5012253
6	3200	70	74,6454247
7	4000	72	76,5836249
8	5000	75	78,5218252



- b. Les deux courbes ne se superposent pas car :
- la loi de masse est une loi théorique ;
 - le caisson acoustique n'est pas parfait ;
 - des erreurs systématiques peuvent exister au niveau du sonomètre ;
 - des erreurs aléatoires existent qui découlent de la qualité de la manipulation ou de son expérimentateur.

Cycle de vie

Le programme

THÈME 3 : Matériaux

Domaines d'étude	Mots-clés
- Cycle de vie.	- Élaboration ; vieillissement ; corrosion ; protection ; recyclage ; élimination.

Les liens avec l'enseignement spécifique

- Groupes caractéristiques.
- pH ; réactions acido-basiques.
- Chimie durable.

Évaluation diagnostique p. 126

SITUATION 1

De nombreuses personnes pensent que les déchets qui ne peuvent pas être jetés dans les poubelles destinées explicitement au recyclage ne vont pas être réutilisés. En réalité, les autres matières plastiques ou autres déchets non recyclables sont pour la plupart revalorisés pour l'énergie qu'ils produisent lors de leur combustion. L'**activité 1** permet de découvrir différents modes de valorisation telle que la valorisation énergétique ou chimique.

SITUATION 2

L'élaboration d'un métal comme le zinc à partir d'un minerai constitué de cristaux brillants tels que ceux présents dans la blende est assez étonnante. Elle nécessite un certain nombre de transformations chimiques, d'où l'importance des installations qui s'y destinent. L'**activité 2** permet de comprendre, en les réalisant, les différentes transformations mises en jeu pour préparer le zinc métallique.

SITUATION 3

La formation de la rouille est un phénomène présent sur de nombreux objets de la vie courante. Il s'agit d'un mélange d'hydroxydes et d'oxydes de fer ; c'est un produit de l'oxydation du fer (pur ou dans un alliage tel que l'acier).

L'**activité 3** permet d'observer ce phénomène et de comprendre comment protéger le fer de cette oxydation.

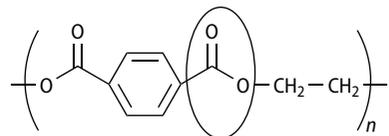
ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

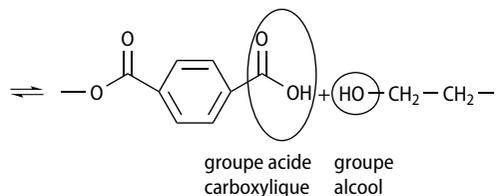
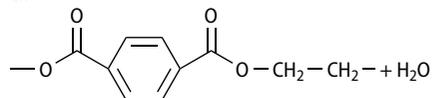
Les matières plastiques

p. 128

1. Le principal constituant d'une matière plastique est un polymère.
2. a. Le document 2 décrit l'hydrolyse des esters.
b. C'est une réaction lente qui peut être accélérée par la présence d'eau (milieu humide).
c. La cible de l'hydrolyse est le groupe ester au centre de la molécule de PET :

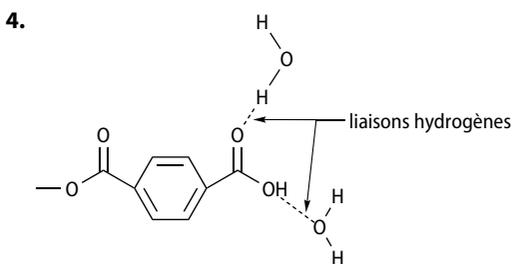


d.



3. a. « Hydro » vient du grec *hydrô* qui signifie « eau », et « phile » vient du grec *phileo* qui signifie « aimer » : hydrophile signifie « ayant une affinité pour l'eau ».

b. Lors de l'hydrolyse des esters, il se forme des acides carboxyliques et des alcools, qui peuvent former des liaisons hydrogène avec l'eau et ont donc plus d'affinité pour l'eau.



5. a. Les matières plastiques s'hydrolysent plus rapidement dans les cours d'eau et leur dégradation entraîne la formation de produits polluants solubles dans l'eau. b. En vieillissant, les propriétés des matières plastiques se dégradent. Les matériaux ne sont plus assez efficaces pour l'utilisation souhaitée. Mais les quantités de matières plastiques utilisées sont colossales, donc les déchets plastiques aussi : les réutiliser constitue donc un enjeu écologique important.

6. a. D'après le document 4, en France on utilise principalement la valorisation chimique de la matière et, à moindre échelle, la valorisation énergétique. L'enfouissement ne permet pas une réutilisation ni en tant que matière plastique recyclée, ni sous forme énergétique. b. La valorisation chimique utilise des espèces chimiques pour réaliser une transformation à l'issue de laquelle le produit formé est réutilisable, alors que la valorisation énergétique utilise une transformation particulière, la combustion, à l'issue de laquelle la matière est détruite mais l'énergie dégagée est utilisable.

7. a. Dans les incinérateurs se produit une combustion.

b. $C_{500}H_{1000}(s) + 750 O_2(g) \rightarrow 500 CO_2(g) + 500 H_2O(l)$. Le dioxyde de carbone formé lors de la combustion est un gaz à effet de serre.

8. a. Le terme utilisé est « désassembler ».

b. Lors de la dépolymérisation, les liaisons sont « cassées ». Or il est très difficile de dépolymériser les plastiques thermodurcissables car ils sont très stables : les liaisons sont donc très difficiles à rompre.

9. La valorisation chimique a pour but de fabriquer des produits réutilisables soit en l'état, soit pour la synthèse d'autres matériaux ; on peut parler de recyclage car il y aura réutilisation en tant que matériau. La valorisation énergétique constitue plutôt une élimination car le matériau incinéré est transformé en produits qui ne constituent pas des matériaux utilisables. Seule la chaleur produite par la combustion est utilisée.

ACTIVITÉ 2

Hydrométallurgie du zinc

p. 130

1. La température augmente jusqu'à 60 °C environ : la réaction est exothermique.

2. Le pH de la solution augmente. Nous pouvons le prévoir car lors de la réaction de dissolution de l'oxyde de zinc, des ions hydrogène H^+ sont consommés.

3. Après filtration, la solution est bleue : on peut donc faire l'hypothèse de la présence d'ions cuivre Cu^{2+} (fiche pratique 10, p 217). Il reste aussi des ions zinc Zn^{2+} et fer Fe^{3+} vu la composition de départ.

4. L'oxyde de zinc se dissout en consommant des ions hydrogène H^+ , ce qui explique l'augmentation de pH lors de cet ajout.

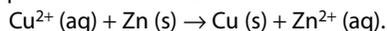
5. On observe un précipité brun. Il s'agit de la jarosite.

6. Les ions fer Fe^{3+} sont éliminés avec la jarosite : il reste donc des ions cuivre Cu^{2+} et zinc Zn^{2+} .

7. $Cu^{2+}(aq) + 2 e^- \rightleftharpoons Cu(s)$

et $Zn(s) \rightleftharpoons Zn^{2+}(aq) + 2 e^-$

d'où l'équation rédox suivante :



8. Après filtration, la solution est incolore : il n'y a plus d'ions cuivre Cu^{2+} , il ne reste que des ions zinc Zn^{2+} .

Remarque : la pile utilisée est une pile LR12.

9. Au niveau de la plaque de plomb, on observe un dégagement gazeux. La plaque de plomb est le pôle positif, siège d'une oxydation : il s'y produit l'oxydation de l'eau qui provoque un dégagement de dioxygène selon $2 H_2O(l) \rightleftharpoons O_2(g) + 4 H^+(aq) + 4 e^-$.

Au niveau de la plaque d'aluminium, on observe un dépôt solide gris. La plaque d'aluminium est le pôle négatif, siège d'une réduction : il s'y produit la réduction des ions zinc qui entraîne le dépôt de zinc métallique selon $Zn^{2+}(aq) + 2 e^- \rightleftharpoons Zn(s)$.

10. On peut détecter plusieurs causes d'incertitude :

– incertitudes liées au matériel (exemple : précision de la balance, qui peut être améliorée par l'utilisation d'une balance plus précise) ;

– incertitudes liées à l'expérimentateur (exemple : lors du séchage de la plaque d'aluminium recouverte de zinc métallique... On peut laisser sécher à l'air libre pour limiter cette incertitude).

11. a. $m = m_2 - m_1 = 42 \text{ mg}$.

b. Sur dix manipulations, la masse m varie de $\pm 5 \text{ mg}$. La dispersion peut être donnée par un encadrement : $37 \text{ mg} \leq m \leq 47 \text{ mg}$. Elle est due aux incertitudes liées à la mesure de masse elle-même, énoncées dans la question 10, auxquelles s'ajoute la mesure du temps. L'incertitude liée au chronomètre est négligeable mais la synchronisation entre le déclenchement de celui-ci et l'action de plonger la plaque dans la solution est, elle, source d'incertitude (de même lors du retrait de la plaque).

Ces incertitudes sont inévitables : même une balance plus précise sera à l'origine d'incertitude de mesure et il est impossible de synchroniser exactement nos différents gestes.

12. On peut donner un encadrement ou, mieux, construire un diagramme en bâtons qui mettra en avant la dispersion des résultats. La valeur la plus probable et un encadrement ni trop large ni trop étroit ressort plus facilement de ce type de représentation.

Remarque : le résultat de la mesure n'est en aucun cas une valeur unique et la moyenne est trop entachée des valeurs aberrantes s'il y en a.

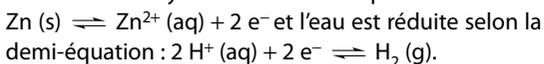
ACTIVITÉ 3

Protection contre la corrosion

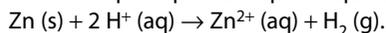
p. 132

1. Une espèce chimique plus réductrice s'oxyde en priorité : elle a plus facilement tendance à perdre des électrons.

2. Le zinc est oxydé selon la demi-équation :

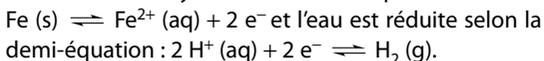


La réaction rédox qui se produit a pour équation :

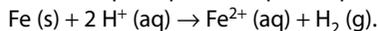


3. Le zinc est oxydé et on observe un dégagement gazeux de dihydrogène.

4. a. Le fer est oxydé selon la demi-équation :



La réaction rédox qui se produit a pour équation :

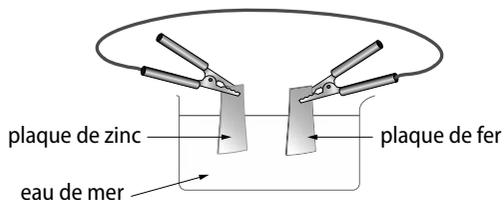


b. Il se forme du dihydrogène.

c. Afin de tester sa présence, on approche une bûchette enflammée d'un tube à essais contenant du dihydrogène. Il se produit une détonation caractéristique de la présence de ce gaz.

5. Dans un tube à essais, on verse quelques millilitres d'acide chlorhydrique, on introduit de la paille de fer et on bouche quelques secondes. On retire le bouchon en approchant rapidement une bûchette enflammée.

6. a. Schéma électrique équivalent :



b. Il s'agit d'une pile.

c. Il y a réduction de l'eau au niveau de la plaque de fer : $2 \text{ H}^{+} \text{ (aq)} + 2 \text{ e}^{-} \rightleftharpoons \text{H}_2 \text{ (g)}$ et oxydation du zinc au niveau de la plaque de zinc : $\text{Zn (s)} \rightleftharpoons \text{Zn}^{2+} \text{ (aq)} + 2 \text{ e}^{-}$ donc la réaction rédox qui se produit a pour équation :

$\text{Zn (s)} + 2 \text{ H}^{+} \text{ (aq)} \rightarrow \text{Zn}^{2+} \text{ (aq)} + \text{H}_2 \text{ (g)}$. Le zinc étant plus réducteur que le fer, il s'oxyde à sa place.

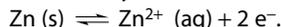
7. On remplace l'eau de mer par de l'acide chlorhydrique dilué pour observer la réaction en un temps plus court.

8. On observe un dégagement gazeux sur la paille de fer. La bûchette enflammée produit une détonation : le gaz est du dihydrogène, ce qui est en accord avec nos prévisions ; il y a réduction de l'eau, donc le fer est oxydé.

9. Il se produit un dégagement gazeux sur le fil de zinc : le zinc est oxydé et l'eau est réduite.

10. a. Sur la paille de fer, on observe un dégagement gazeux, il y a donc réduction de l'eau selon la demi-équation suivante : $2 \text{ H}^{+} \text{ (aq)} + 2 \text{ e}^{-} \rightleftharpoons \text{H}_2 \text{ (g)}$.

Le fil de zinc est donc oxydé selon la demi-équation :



b. Le pH augmente dans le cristalliseur car il y a consommation des ions hydrogène selon la réaction rédox d'équation : $\text{Zn (s)} + 2 \text{ H}^{+} \text{ (aq)} \rightarrow \text{Zn}^{2+} \text{ (aq)} + \text{H}_2 \text{ (g)}$.

c. L'électrode de fer est le pôle positif car il y a réduction et l'électrode de zinc est le pôle négatif car il y a oxydation. Le système forme une pile.

11. a. $m(\text{Fe}) = [m_{\text{finale}} - m_{\text{initiale}}] \cdot M_{\text{Fe}} / M_{\text{Zn}}$.

b. $m(\text{Fe}) = 0,046 \text{ g}$ (avec une balance précise au mg près).

12. a. La principale incertitude est liée aux deux mesures de masse nécessaires pour obtenir la différence de masse, donc l'incertitude liée à la précision de la balance.

b. Si la balance utilisée est précise au mg près (respectivement cg), on peut donner comme résultat de mesure $m(\text{Fe}) = 46 \text{ mg}$ (resp. 5 cg).

13. Oui car la masse de fer protégée est faible pour un fil de zinc de 1,9 g.

14. Le zinc s'oxyde à la place du fer : ainsi il le protège de la corrosion. L'appellation « anode sacrificielle » est donc adaptée.

EXERCICES

COMPÉTENCE : Analyser des documents scientifiques

1. Les facteurs cinétiques étudiés sont l'état de division du zinc et la présence ou non d'une couche de carbonate de zinc. Les autres paramètres sont en effet semblables dans les trois expériences.

2. La vitesse de réaction est plus élevée dans l'expérience 1 que dans l'expérience 2. La poudre de zinc, qui possède une plus grande surface de contact avec la solution, réagit plus vite que la grenaille de zinc : plus la surface de contact est grande, plus la réaction est rapide.

3. a. Le zinc réagit avec le dioxyde de carbone présent dans l'air pour former une couche principalement constituée de carbonate de zinc.

b. Lors de l'expérience 3, la vitesse de réaction est beaucoup plus faible que dans l'expérience 2, qui utilise aussi la grenaille de zinc. La couche de carbonate de zinc ralentit donc la réaction : elle joue un rôle protecteur pour le zinc.

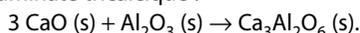
4. Seule la réaction de l'expérience 1 atteint son état final durant le temps de l'expérience. Dans ce cas, par lecture graphique, on lit $t_{1/2} = 37$ min.

2 1. $\text{CaCO}_3 (\text{s}) \rightarrow \text{CaO} (\text{s}) + \text{CO}_2 (\text{g})$.

2. a. Pour l'alite : $3 \text{CaO} (\text{s}) + \text{SiO}_2 (\text{s}) \rightarrow \text{Ca}_3\text{SiO}_5 (\text{s})$.

Pour la bélite : $2 \text{CaO} + \text{SiO}_2 (\text{s}) \rightarrow \text{Ca}_2\text{SiO}_4 (\text{s})$.

Pour l'aluminate tricalcique :



b. Le réactif en excès est la chaux car il en reste dans le clinker à la fin.

3. Le four est incliné pour que les réactifs roulent naturellement des températures moins élevées (formation de la chaux) vers des températures plus élevées (les transformations du **2.a.** se produisent).

4. a. Il s'agit d'une trempe.

b. Son but est de stopper les réactions pour obtenir des proportions correctes de chaque produit.

3 1. a. Avant l'oxydation, la matière plastique absorbe dans les longueurs d'onde autour de 360 nm.

b. Il s'agit d'un rayonnement UV.

c. Non, puisqu'elle absorbe dans l'UV.

2. a. Après l'oxydation, elle absorbe toujours autour de 360 nm, mais également autour de 450 nm.

b. Il s'agit du rayonnement UV et de radiations visibles bleues.

c. Lorsque la matière absorbe le bleu, notre œil perçoit la couleur complémentaire, c'est-à-dire le jaune. Après oxydation, on peut donc dire que les matières plastiques jaunissent.

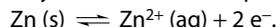
3. Un suivi colorimétrique est directement lié à la couleur perçue par l'œil humain, mais comme le suivi cinétique est problématique, aucune étude quantitative n'est possible.

4. Il s'agit de la loi de Beer-Lambert, qui lie l'absorbance à la concentration de l'espèce qui absorbe le rayonnement.

COMPÉTENCE : Pratiquer une démarche expérimentale

4 A. 1. Le courant se déplace de l'électrode d'acier vers l'électrode de zinc et les électrons en sens inverse.

2. a. Le zinc s'oxyde selon la demi-équation :



b. Il s'agit d'une oxydation puisque le zinc cède des électrons.

3. a. Sur l'électrode d'acier, il y a donc une réduction. D'après l'énoncé, l'électrode d'acier se couvre d'un dépôt de zinc, d'où la demi-équation : $\text{Zn}^{2+} (\text{aq}) + 2 \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Zn} (\text{s})$.

b. $\text{Zn} (\text{s}) + \text{Zn}^{2+} (\text{aq}) \rightarrow \text{Zn} (\text{s}) + \text{Zn}^{2+} (\text{aq})$.

4. Au cours de l'électrolyse, la concentration en ions zinc reste constante d'après l'équation de la réaction écrite au **3.b.**

B. 1. $\text{Zn}^{2+} (\text{aq}) + 2 \text{OH}^- (\text{aq}) \rightarrow \text{Zn}(\text{OH})_2 (\text{s})$.

2. À l'équilibre : $[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} = \frac{K_e}{[\text{HO}^-]_{\text{éq}}}$ et

$$\text{pH} = -\log([\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}})$$

$$\text{donc } \text{pH} = -\log \frac{1,0 \times 10^{-14}}{3,16 \times 10^{-9}} = 5,5.$$

3. Il est nécessaire que le pH soit inférieur à 5,5 pour éviter la précipitation des ions zinc sous forme d'hydroxyde de zinc. Il serait alors impossible de les réduire pour déposer du zinc métallique sur l'acier.

COMPÉTENCE : Résoudre des problèmes scientifiques

5 1. Un matériau amorphe possède une répartition désordonnée de ses constituants au niveau microscopique contrairement à un matériau cristallin qui possède une structure ordonnée.

2. Il s'agit de matière qui reste à l'état liquide alors que sa température est inférieure à la température de cristallisation.

3. a. $V > V_{\text{amorphe}} > V_{\text{cristal}}$

b. La structure désordonnée et agitée du liquide est plus volumineuse que la structure désordonnée du matériau amorphe, qui est plus volumineuse que la structure ordonnée du cristal.

4. a. La viscosité augmente quand la température diminue.

b. Comme les constituants se déplacent plus lentement, ils n'ont pas assez de mobilité pour atteindre la position qu'ils auraient dans le solide cristallin. Puis lorsque la viscosité est trop élevée, leur vitesse est quasiment nulle : ils restent bloqués.

5. a. La vitesse de cristallisation est nulle jusqu'à 1 000 °C, donc la température de cristallisation est de 1 000 °C.

b. Vers 600 °C la vitesse de cristallisation redevient nulle. Elle s'arrête car la viscosité est devenue trop importante : elle bloque la cristallisation.

c. Si on diminue la température assez rapidement, la cristallisation n'a pas le temps de commencer.

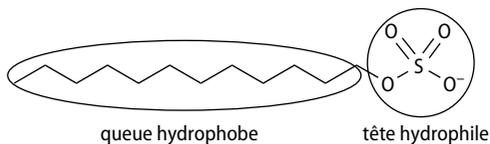
6 A. 1. La soude et l'eau servent à rompre les liaisons hydrogène qui rigidifient les chaînes.

2. Le silicate de sodium gonfle les fibres : ainsi les particules d'encre en surface se décrochent plus facilement et se dissolvent plus facilement dans l'eau.

3. Le but est de défibrer le papier et de retirer les colorants des encres solubles dans l'eau.

B.

1.



2. La tête hydrophile s'oriente vers la solution aqueuse tandis que la queue hydrophobe fuit cette solution et s'oriente vers les encres non solubles dans l'eau.

3. a. Non car les encres non solubles dans l'eau ne peuvent se dissoudre en solution aqueuse.

b. Les molécules tensioactives isolent les encres de l'eau en formant les micelles, ce qui permet aux encres de se détacher du papier.

Structure et propriétés des conducteurs

Le programme

THÈME 3 : Matériaux

Domaines d'étude	Mots-clés
– Structure et propriétés.	– Conducteurs ; supraconducteurs ; cristaux liquides. – Semi-conducteurs ; photovoltaïques.

Les liens avec l'enseignement spécifique

- Problématiques énergétiques contemporaines.
- Caractéristiques d'une image numérique ; pixellisation et codage RVB.
- Transitions d'énergie électroniques.

Évaluation diagnostique p. 138

SITUATION 1

Cette situation a pour objet de vérifier que les élèves ont bien acquis que lorsqu'un conducteur est traversé par un courant électrique, il s'échauffe et que ce phénomène à l'origine de perte d'énergie électrique sous forme d'énergie thermique est appelé : l'effet Joule. La connaissance de l'effet Joule permettra d'aborder la structure et les propriétés des matériaux conducteurs dans l'**activité 1** et de comprendre l'intérêt des matériaux supraconducteurs dans l'**activité 3**.

SITUATION 2

Cette situation a pour objectif de découvrir les effets d'un matériau supraconducteur. Ce dernier, à très basses températures, est en mesure de faire léviter un aimant au-dessus de lui.

Si un matériau supraconducteur peut ainsi repousser un aimant, ce n'est pas, comme un élève pourrait justement le penser, parce qu'il acquière lui-même les propriétés magnétiques d'un aimant (deux aimants qui présentent deux pôles différents se repoussent). L'**activité 3** permettra de comprendre ce phénomène particulier appelé effet Meissner.

SITUATION 3

Cette situation a pour objectif d'amorcer une réflexion sur la provenance possible de la lumière émise par une diode électroluminescente, semi-conducteur dans lequel circulent des électrons.

Les élèves ayant abordé, dans l'enseignement spécifique, ce qu'on appelle une transition électronique, passage d'un électron d'un niveau d'énergie à un autre, et l'émission de photon qui peut l'accompagner ont les connaissances pour aborder ce questionnement.

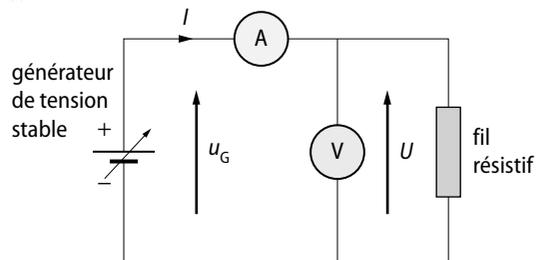
L'**activité 4** permettra de comprendre le principe d'un semi-conducteur et d'expliquer la transition électronique permettant l'émission de lumière.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

Conducteurs ohmiques : ça chauffe ! p. 140

- a. Pour faire varier la tension aux bornes du fil résistif, on peut utiliser un rhéostat ou faire varier la tension directement au niveau du générateur.
- b.



- Plusieurs paramètres peuvent avoir éventuellement une conséquence sur cette caractéristique comme la longueur du fil résistif, son épaisseur, sa constitution...

3. Série 1. Alliage Cuivre-Nickel : diamètre 0,25 m ; longueur 1 m.

U (en V)	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
I (en A)	0,0	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50

Série 2. Alliage Cuivre-Nickel : diamètre 0,25 m ; longueur 0,5 m.

U (en V)	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
I (en A)	0,0	0,20	0,40	0,60	0,80	1,0

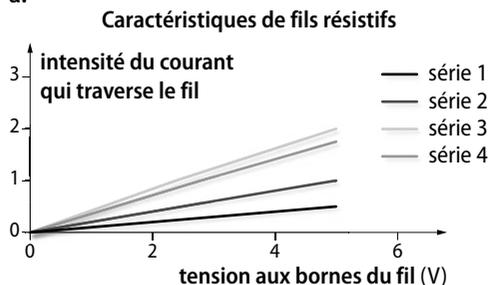
Série 3. Alliage Cuivre-Nickel : diamètre 0,5 m ; longueur 1 m.

U (en V)	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
I (en A)	0,0	0,40	0,8	1,2	1,6	2,0

Série 4. Alliage Nickel-Chrome : diamètre 0,5 m ; longueur 0,5 m.

U (en V)	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
I (en A)	0,0	0,36	0,72	1,1	1,4	1,8

4. a.



b. D'après les caractéristiques représentées, pour tout fil résistif, l'intensité du courant I qui le traverse est proportionnelle à la tension U à ses bornes et donc obéit à la loi d'Ohm ($U = R \cdot I$), donc un fil résistif peut être considéré comme un conducteur ohmique.

5. a. Pour déterminer la résistance de chaque fil résistif, il faut déterminer la pente de chaque droite de caractéristique.

Alliage Cuivre-Nickel diamètre 0,25 m longueur 1 m	Alliage Cuivre-Nickel diamètre 0,25 m longueur 0,5 m	Alliage Cuivre-Nickel diamètre 0,5 m longueur 1 m	Alliage Nickel-Chrome diamètre 0,5 m longueur 0,5 m
$R = 10 \Omega$	$R = 5,0 \Omega$	$R = 2,5 \Omega$	$R = 2,8 \Omega$

b. En utilisant un ohmmètre, les valeurs mesurées des résistances doivent être très proches voire identiques de celles déterminées par l'étude des caractéristiques.

6. a. La résistance d'un fil résistif semble dépendre :

- de sa longueur ;
- de sa section ;
- de l'alliage utilisé.

La relation qui traduit la valeur de résistance est :

$$R = \rho \cdot l/S.$$

En effet, elle traduit que la valeur de la résistance R augmente quand la longueur l du fil augmente et diminue quand la valeur de sa section S augmente.

7. a. L'unité de la résistivité ρ est $\Omega \cdot m$.

b.

Alliage Cuivre-Nickel diamètre 0,25 m longueur 1 m	Alliage Cuivre-Nickel diamètre 0,25 m longueur 0,5 m	Alliage Cuivre-Nickel diamètre 0,5 m longueur 1 m	Alliage Nickel-Chrome diamètre 0,5 m longueur 0,5 m
$R = 10 \Omega$	$R = 5,0 \Omega$	$R = 2,5 \Omega$	$R = 2,8 \Omega$
$\rho = R \cdot (\pi (d/2)^2/l) = 0,49 \Omega \cdot m$	$\rho = 0,49 \Omega \cdot m$	$\rho = 0,49 \Omega \cdot m$	$\rho = 1,1 \Omega \cdot m$

8. L'allure de la caractéristique tension-intensité d'un conducteur ohmique est une droite qui passe par l'origine et qui traduit une relation de proportionnalité entre les deux grandeurs électriques.

9. Le dégagement de chaleur produit par l'utilisation de fils résistifs dans un siège chauffant est dû notamment à la résistivité de l'alliage utilisé pour concevoir le fil résistif qui freine le déplacement des électrons libres dans le matériau et de façon général de la longueur et de la section du fil.

10. Un fil résistif doit avoir une longueur importante, une section faible et une résistivité pas trop petite.

ACTIVITÉ 2

L'envol de la supraconductivité

p. 142

1. a. Le phénomène de supraconduction peut concerner les métaux et leurs alliages.

b. Ces matériaux peuvent devenir supraconducteurs à des températures proches du zéro absolu.

2. a. Au niveau électrique, la supraconductivité se traduit par une résistance nulle au courant électrique.

b. Au niveau magnétique, le phénomène s'accompagne d'une exclusion de tout champ magnétique.

3. La supraconduction est utilisée :

- dans les transports : train à sustentation magnétique ;
- dans l'énergie : utilisation de câbles qui ne présentent aucune résistivité au passage du courant électrique.

4. a. Le principal avantage est d'éviter les pertes par effet Joule.

b. Le principal inconvénient est que le phénomène de supraconductivité nécessite de travailler à très faibles températures et donc d'utiliser des systèmes de réfrigérations.

5. a. Le « zéro absolu » correspond à une température de 0 K, soit -273 K.

b. L'effet Meissner est l'effet d'exclusion de tout champ magnétique observé pour un matériau supraconducteur.

6. La supraconductivité s'explique au niveau microscopique par la physique quantique. Dans un métal, les électrons se comportent comme une onde qui s'étale sur plusieurs atomes. Dans un matériau supraconducteur, cette onde occupe tout le matériau.

La supraconduction est à la fois un phénomène électrique car un matériau supraconducteur a une résistance électrique nulle et un phénomène magnétique car un matériau supraconducteur rejette tout champ magnétique. La recherche sur la supraconduction est importante car il est important de pouvoir transporter de l'électricité sans perte d'énergie mais cela n'est réellement pertinent que s'il est possible de concevoir de tels matériaux à des températures proches des températures ambiantes.

ACTIVITÉ 3

Des cristaux liquides dans nos écrans *p. 144*

- a.** Les cristaux liquides sont nommés ainsi car ils combinent les propriétés d'un liquide conventionnel et d'un solide cristallisé.
- b.** Ces matériaux peuvent devenir supraconducteurs à des températures proches du zéro absolu.
- 2.** On peut modifier les propriétés des cristaux liquides en appliquant des champs électriques ou magnétiques, ou en changeant la température.
- 3.** Les cristaux liquides sont utilisés dans les cadrans à affichage digital ou les écrans LCD.
- 4.** Lorsqu'ils sont soumis à une tension électrique, la capacité des cristaux liquides à diffuser de la lumière se trouve modifiée.
- 5. a.** Le pixel rouge est le pixel le plus lumineux.
- b.** Dans un écran LCD, l'intensité lumineuse des pixels est régulée par les cristaux liquides qui s'orientent, sous l'action d'une tension électrique, de telle sorte que la lumière initialement polarisée soit en mesure d'éclairer plus ou moins un filtre coloré présent en sortie. Si les cristaux liquides s'orientent dans le sens de propagation de la lumière, cette dernière n'est pas transmise. Si les cristaux liquides s'orientent perpendiculairement au sens de propagation de la lumière, celle-ci est transmise.
- 6.** Les particularités des cristaux liquides sont qu'ils s'orientent sous l'action d'une tension électrique et qu'ils peuvent ainsi avoir soit les propriétés d'un liquide, soit les propriétés d'un solide cristallisé.
- 7.** L'intérêt d'utiliser des cristaux liquides dans un écran est de posséder un matériau dont les propriétés optiques se modifient en fonction de la tension permettant de réguler l'éclairage de filtres RVB.

ACTIVITÉ 4

Un semi-conducteur « lumineux » *p. 146*

- a.** Les semi-conducteurs ont des propriétés de conductivité électrique intermédiaires entre celles des conducteurs et des isolants.
- b.** Cette conductivité est assurée par des électrons et les trous (espaces laissés libres par les électrons qui se déplacent) au sein du matériau.

c. La conductivité d'un semi-conducteur peut être augmentée par dopage P (augmentation du nombre de trous) et par dopage N (augmentation de dopage N).

2. Au niveau des atomes qui constituent un matériau semi-conducteur, si les électrons de la dernière couche possèdent suffisamment d'énergie, ils peuvent se « détacher » de leur atome et assurer ainsi la conduction d'un courant, comme un électron libre. Dans ce cas, les électrons sont dans un état « excité ». Les électrons libres remplissent les trous à conditions qu'ils puissent se débarrasser de leur énergie. Dans une diode électro-luminescente, ils peuvent le faire en émettant de la lumière.

3. a. Un jonction PN ne conduit pas naturellement le courant car le déplacement des électrons et des trous proches de la frontière PN crée une barrière infranchissable pour les autres.

b. Pour que la jonction PN conduise le courant, il faut lui appliquer une tension.

c. Cela se traduit sur la caractéristique par l'existence d'une tension seuil.

4. Lors d'une polarisation inverse, la jonction PN ne conduit pas le courant.

5. Une DEL est un semi-conducteur car elle est formée d'une jonction PN.

6. Une DEL émet de la lumière si elle est branchée en polarisation directe et que la tension à ses bornes est supérieure à une tension dite tension seuil.

ACTIVITÉ 5

Capteurs de température d'une automobile *p. 148*

1. Une thermistance est caractérisée par la résistance et la température.

2. Pour une thermistance, il existe une relation entre la valeur de la résistance et la température. La connaissance de la valeur de la résistance permet d'accéder à la valeur de la température.

3. a. Au niveau de la thermistance, il est possible de mesurer la valeur de la résistance du matériau.

b. Le moyen le plus simple de mesurer la résistance est de brancher un ohmmètre directement aux bornes de la thermistance.

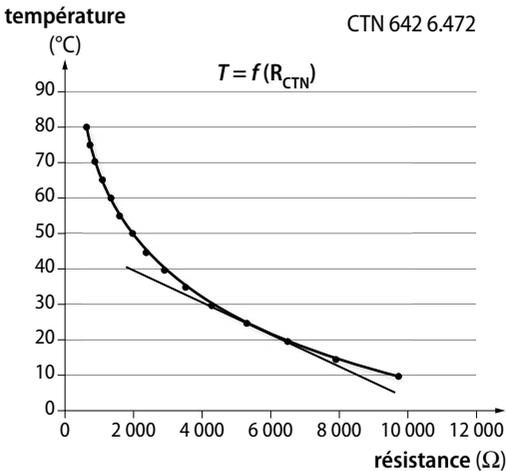
4. a. Pour montrer qu'il existe un lien entre la température et la résistance d'une thermistance, on fait varier la température que l'on mesure à l'aide d'un thermomètre et on met en évidence la variation de la résistance qui en résulte.

b. Pour faire varier la température, on utilise une plaque chauffante. On plonge la thermistance, reliée à un ohmmètre, dans un bécher contenant de l'eau froide dans laquelle on plonge un thermomètre. On fait chauffer l'eau et on relève une succession de couples de valeurs résistance-température.

5. Température (en °C) et résistance (en Ω).

10	9700
15	7900
20	6500
25	5300
30	4300
35	3500
40	2900
45	2372
50	1949
55	1597
60	1321
65	1090
70	907
75	745
80	615

6.



7. Pour déterminer la température ambiante, on place la thermistance à l'aide libre et on mesure la résistance puis à l'aide du graphe, on détermine la température correspondante.

8. a. Une thermistance est caractérisée par la résistance et la température.

b. À 25 °C, la résistance est de 5 300 Ω. C'est la valeur qui s'approche le plus de celle correspondant à la CTN 642 6.472

9. a. $\Delta R/\Delta T = -12\ 000/45 = -267$.

b. $\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta T} = (1/5\ 300) \times (-267) = -0,05 = -5\ \%/K$.

C'est la valeur qui s'approche le plus de celle correspondant à la CTN 642 6.472

c. Il est très délicat de se baser sur la pente de la tangente tracée en un point car une petite modification de la tangente modifie la valeur de sa pente et donc les conclusions au regard du tableau de données.

10. Pour mesurer une température à l'aide d'une thermistance, on branche la thermistance à un ohmmètre et on en déduit la valeur de la température correspondante à la valeur de la résistance mesurée.

11. a. Les thermistances sont des résistances non linéaires car la valeur de leur résistance n'est pas proportionnelle à la valeur de la température.

b. Le terme de coefficient de température négatif est adapté car on a bien une valeur de $\Delta R/\Delta T$ qui est négative.

ACTIVITÉ 6

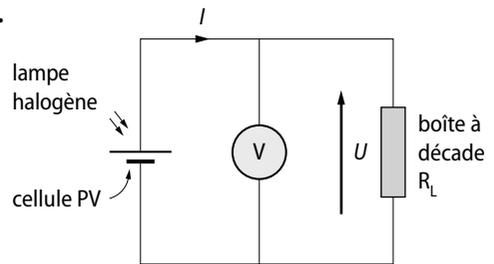
Fonctionnement d'un panneau solaire

p. 150

1. La valeur de l'intensité I en sortie de la cellule photovoltaïque est mesurée indirectement à l'aide du voltmètre branché en parallèle qui mesure la tension U aux bornes d'une boîte à décade de résistance R_L .

La loi d'Ohm permet d'écrire $I = U/R_L$.

2.



3. Pour faire varier les conditions d'éclairement de la cellule photovoltaïque tout en assurant un éclairage homogène, on peut éloigner ou rapprocher la lampe de la cellule.

4. Dans un panneau photovoltaïque, les cellules sont associées soit en série, soit en parallèle.

a. En série, la grandeur électrique commune aux cellules associées est l'intensité électrique.

En parallèle, la grandeur électrique commune aux cellules associées est l'intensité électrique.

b. La grandeur électrique modifiée est, pour une association série, la tension qui est plus importante et, pour une association parallèle, l'intensité qui est plus importante.

5.

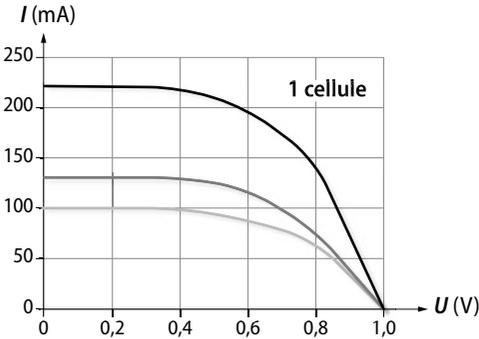
	U (V)	0	0,2	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Éclairement faible	I (mA)	100	100	100	90	80	70	0	0
Éclairement moyen	I (mA)	130	130	130	120	110	80	30	0
Éclairement fort	I (mA)	220	220	220	200	190	150	80	0

6. a.

	U (V)	0	0,25	0,5	0,75	1	1,5	2	2,5	4	4,5	5,0
1 PV	I (mA)	200	190	150	0	0	0	0	0	0	0	0
3 PV	I (mA)	200	190	180	170	160	150	0	0	0	0	0
6 PV	I (mA)	200	190	180	170	160	150	150	150	150	80	0

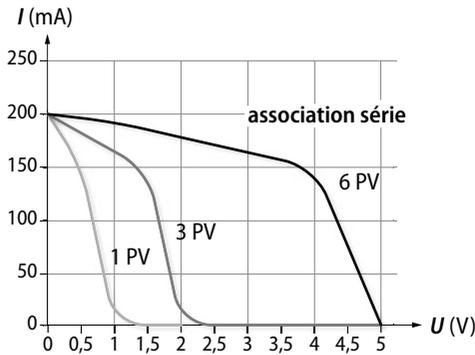
b.	U (V)	0	0,25	0,5	0,75	1
1 PV	I (mA)	200	190	150	0	0
1 PV en para avec 1 PV	I (mA)	400	380	300	0	0

7. a.



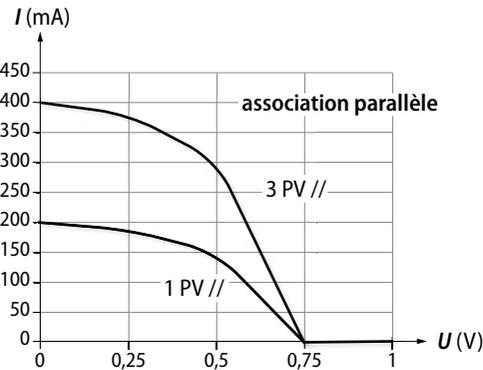
b. Le paramètre qui est modifié avec l'éclairement est l'intensité du courant.

8. a.



b. Le paramètre qui est modifié est la tension. L'intensité du courant qui circule dans le circuit est la même.

9. a.



b. Le paramètre qui est modifié est l'intensité. L'intensité totale est plus importante.

10. Un panneau photovoltaïque se comporte comme un générateur d'intensité continue. En associant plu-

sieurs cellules photovoltaïques en parallèle, on augmente l'intensité totale qu'il est possible de produire.

11. a. L'utilisation des panneaux solaires est limitée car ils nécessitent qu'il y ait de la lumière (du soleil).

b. On relie le générateur de tension à une batterie pour que cette dernière puisse conserver l'énergie électrique produit.

c. La diode « anti-retour » évite à la batterie de se vider dans le panneau photovoltaïque.

EXERCICES

COMPÉTENCE : Analyser des documents scientifiques

1. La résistance du corps humain dépend de la tension et de l'humidité.

2. Il est moins dangereux pour le corps humain d'être traversé par un courant alternatif d'intensité 100 mA pendant 50 ms que par un courant alternatif d'intensité 50 mA pendant 2 s

2. 1. Une thermistance est un conducteur dont la résistance dépend de la température.

2. a. Une thermistance CTN (thermistance à coefficient de température négatif) est une thermistance dont la résistance diminue quand la température augmente.

b. Une thermistance CTP (thermistance à coefficient de température positif) est une thermistance dont la résistance augmente quand la température augmente, sur une certaine gamme de températures.

3. Une thermistance CTN peut être utilisée sur une large gamme de températures.

Une thermistance CTP ne pourra être utilisée que dans une gamme de températures réduite (entre 10 et 70 °C).

4. Pour la thermistance CTN, à une valeur de résistance correspond une seule valeur de température. C'est donc un capteur linéaire, ce qui n'est pas le cas de la thermistance CTP.

3. 1. a. Dans l'obscurité, une photodiode a le comportement d'une diode normale : le courant est nul pour une tension qui reste inférieure à une tension seuil.

b. Quand une photodiode est éclairée, il existe un courant, qui augmente avec l'intensité de la lumière.

2. Le document b montre qu'il existe une relation linéaire entre l'intensité du courant et l'éclairement.

3. a. La valeur de longueur d'onde à laquelle la photodiode est la plus sensible est autour de 850 nm.

b. Cette radiation appartient à l'infrarouge.

4. 1. Le régime supraconducteur se caractérise par une conduction du courant infini donc par une résis-

tance nulle (et par l'effet Meissner c'est-à-dire un rejet de tout champ magnétique).

2. a. L'arrivée d'un photon à la surface du matériau supprime la supraconductivité.

b. Ce phénomène peut s'expliquer par un apport d'énergie par le photon et donc une augmentation de température.

3. À l'aide de matériaux supraconducteurs, on peut fabriquer des détecteurs de photons. En effet, l'arrivée d'un photon mettant fin aux propriétés supraconductrices, l'intensité du courant dans un circuit électrique serait diminué et donc un voyant lumineux pourrait ne plus être allumé.

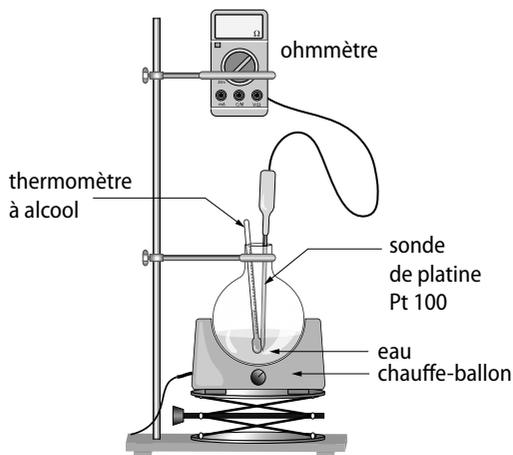
COMPÉTENCE : Pratiquer une démarche expérimentale

5 Pour montrer que la valeur de la résistance d'un conducteur qui se comporte comme une thermistance dépend de la température, on peut relier les deux bornes de la thermistance à un ohmmètre et montrer que quand on réchauffe la thermistance entre ses mains la valeur de la résistance augmente (thermistance CTP) ou diminue (thermistance CTN).

6 1. Unité de A : $A \cdot T$ est sans dimension, T est en $^{\circ}\text{C}$ donc A est en $^{\circ}\text{C}^{-1}$.

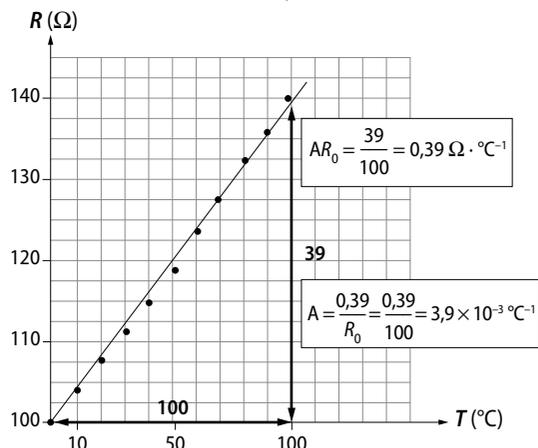
Unité de B : $B \cdot T^2$ est sans dimension, T est en $^{\circ}\text{C}$ donc B est en $^{\circ}\text{C}^{-2}$.

2.



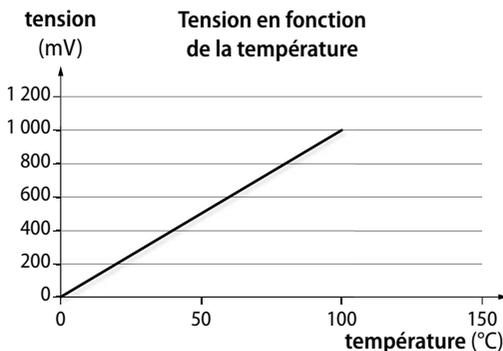
3. On sélectionne le bon calibre d'un ohmmètre en commençant par le plus grand, puis en diminuant ; on s'arrête au calibre juste au-dessus de la valeur mesurée.

4. Valeur expérimentale A_{exp} de A :



5. A (théorique) et A_{exp} sont identiques. Ce résultat confirme que le modèle linéaire constitue une très bonne approximation de la relation complète.

7 A. 1.



2. Dans la plage de température $[0^{\circ}\text{C} ; 100^{\circ}\text{C}]$, on a bien une droite qu'on peut modéliser à l'aide d'un tableur grapheur par $U_C = 9,8 \cdot \theta$ avec U_C exprimée en mV et θ en $^{\circ}\text{C}$.

3. $s = \Delta y / \Delta x = 9,8 \text{ mV} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$.

4. $\Delta U_C = 9,8 \times 0,5 = 4,9 \text{ mV}$.

5. $10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C} \pm 0,2 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$, ce qui correspond bien à $9,8 \text{ mV} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$.

B. 1. $U_C \text{ (mV)} = 9,8 \times \theta$

$U_S = 5,1 \times U_C$ donc $U_S \text{ (mV)} = 5,1 \times U_C \text{ (mV)} = 50 \times \theta$
donc $U_S \text{ (V)} = 0,050 \times \theta$
donc $\theta = 20 \times U_S \text{ (V)}$.

2. $\Delta U_S \text{ (V)}_{\text{min}} = 20 \text{ mV}$ donc $\Delta \theta_{\text{min}} = 400 \text{ mV}$.

C. Le CAN traduit le signal analogique U_S en grandeur numérique. À chaque instant, il affiche un nombre de sorties N_S codé sur n bits. Ce nombre est égal à la partie entière du rapport U_S/q avec U_S tension d'entrée du CAN (en V) et q quantum ou résolution du CAN (en volts).

Le quantum correspond au pas de conversion du CAN et il est calculable par la relation :

$$q = (U_{S_{\max}} - U_{S_{\min}}) / 2^n$$

avec n nombre de bits, $U_{S_{\max}}$ tension maximale d'entrée du CAN, $U_{S_{\min}}$ tension minimale d'entrée du CAN.

1. $q = 100$ mV.

$$N_5 = U_S / q = 1,2 / 0,1 = 12.$$

En 4 bits, le nombre 12 s'écrit 1 100.

2. On dispose de 2 CAN (à 4 bits et à 8 bits) ayant une plage d'utilisation en tension allant de 0 V à 5 V. On appelle q_4 et q_8 respectivement les quantums des CAN à 4 bits et à 8 bits.

$$q = (U_{S_{\max}} - U_{S_{\min}}) / 2^n.$$

$$q_4 = 5 / 2^4 = 310 \text{ mV}.$$

$$q_8 = 5 / 2^8 = 19,5 \text{ mV}.$$

3. a. Compte tenu de la précision de 20 mV voulue dans la lecture de U_S , on utilisera le CAN à 8 bits qui a un quantum légèrement inférieur à la précision voulue.

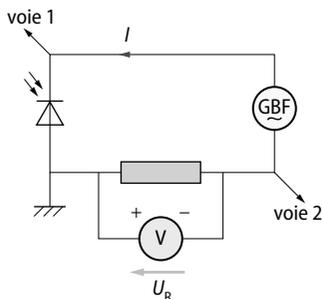
b. Le nombre possible de valeurs numériques qu'il peut fournir en sortie est $2^n = 256$.

8 1. L'oscilloscope ou le système d'acquisition ne pouvant afficher que des tensions, on peut avoir une « image du courant » traversant la photodiode en les branchant aux bornes d'une résistance de valeur connue R . En mesurant la tension U_R aux bornes de la résistance, on accède à l'intensité du courant en utilisant la loi d'Ohm :

$$I = U_R / R.$$

2. On utilisera à cet effet un générateur de tension alternative de type GBF, qui permet de faire varier la tension.

3. et 4. a.



b. Il faudra inverser la voie 2 pour bien avoir $I = U_R / R$ et non $I = -U_R / R$.

5. a. La lumière a pour effet de créer un courant au niveau de la photodiode.

b. On utilisera un photodiode en inverse ($U < 0$), car l'objectif est d'utiliser le courant électrique généré par la photodiode, ce qui n'est le cas que quand $U < 0$.

9 1. Un condensateur sert à condenser la lumière. Un diaphragme limite le faisceau lumineux. Une lentille convergente permet de faire converger la lumière.

2. En absence de champ électrique, les cristaux liquides font tourner le plan de polarisation d'une lumière polarisée.

3. a. La situation **B** traduit la présence d'un champ électrique (la lumière ne passe plus).

b. Les cristaux liquides s'orientent dans la direction du champ.

COMPÉTENCE : Résoudre des problèmes scientifiques

10 1. a. Un semi-conducteur peut être utilisé comme capteur photographique car les photons provenant d'une lumière incidente peuvent arracher des électrons présents dans le matériau et leur conférer suffisamment d'énergie pour qu'ils puissent assurer la conduction du courant. La présence d'un courant électrique traduit la présence de lumière.

b. L'énergie des photons incidents est transférée aux électrons.

2. Éléments de la chaîne de transmission d'information qui permet à un caméscope ou à un appareil photographique numérique d'obtenir l'image numérique d'un objet photographié :

photodiodes/capteur CCD – amplification – convertisseur analogique-numérique

11 1. a. Une LED émet dans l'infrarouge (IR) si l'énergie libérée lors de la déséxcitation d'un électron est telle que la longueur d'onde associée soit dans le domaine de l'IR.

b. Une photodiode peut être sensible aux IR si l'énergie associée à ce rayonnement est telle qu'elle permet d'exciter les électrons présents initialement dans le matériau semi-conducteur.

2. a. Pour mesurer le courant dans le circuit « récepteur », on utilise une résistance de valeur R connue et on mesure la tension U aux bornes de cette résistance pour accéder à l'intensité I grâce à la loi d'Ohm : $I = U / R$.

b. On utilise une résistance de $1 \text{ M}\Omega$ dans le circuit « récepteur » car l'intensité du courant est faible et on cherche à mesurer une tension (plus R est importante, plus U mesurée est importante d'après la loi d'Ohm $U = R \cdot I$).

3. a. En face d'une bande noire, il y a aucun rayonnement réfléchi, donc on ne mesure aucun courant.

b. En face d'une lumière blanche, il y a un rayonnement réfléchi, donc on mesure un courant électrique.

4. Un détecteur de code-barres est constitué de plusieurs LED.

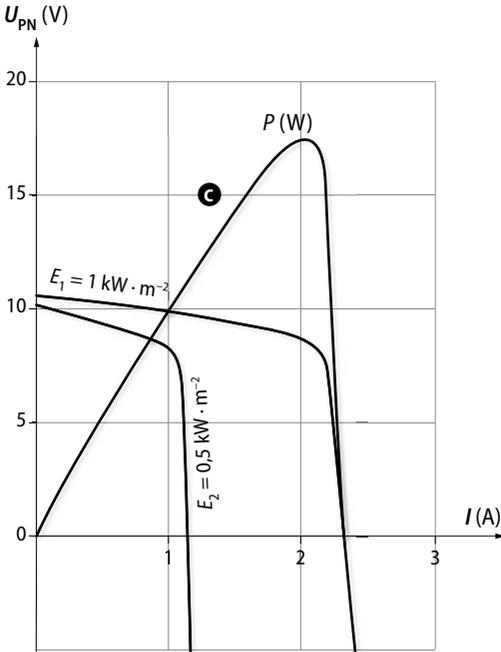
12 1. a. Les particules qui arrivent à la surface du matériau photovoltaïque sont les photons.

b. Au contact du matériau semi-conducteur, leur énergie est transférée aux électrons du matériau.

2. a. Les électrons libres dans les fils conducteurs assurent la conduction du courant ainsi produit.

b. Les cellules photovoltaïques branchées en parallèle permettent d'obtenir une intensité de courant plus importante.

13 A. 1.



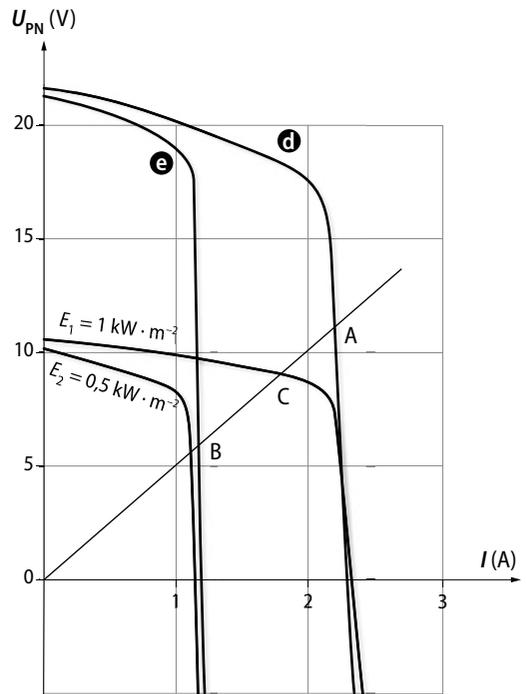
Les courbes fournies indiquent la tension U d'un panneau en fonction de I . La puissance fournie est donc le produit $P = U \cdot I$ ce qui donne la courbe **c**.

2. Pour l'éclairement E_1 , la puissance maximale est de l'ordre de 17,5 W qui correspond à un point de fonctionnement qui correspond à $I = 2$ A et $U = 8,75$ V.

3. La puissance lumineuse reçue par le panneau est :
 $P_1 = 18 \cdot E_1 \cdot \pi \cdot R^2 = 141,3$ W.

Le rendement est donc de $\eta = 17,5/141,1 = 12,4$ %.

B. 1. a.



Deux panneaux en série recevant chacun un éclairement E_1 conduisent à la courbe **d**.

b. On trace la caractéristique du conducteur de résistance $R = 5 \Omega$ (droite de pente $5 \text{ V} \cdot \text{A}^{-1}$). La droite coupe la courbe **d** en un point A correspondant à $I = 2,2$ A et $U = 11,1$ V.

c. Chaque panneau délivre une puissance :

$$P_1 = 2,2 \times 5,55 = 12,2 \text{ W.}$$

2. Les deux panneaux en série recevant respectivement un éclairement E_1 et un éclairement E_2 conduisent à la courbe **e**.

a. La caractéristique du conducteur de résistance $R = 5 \Omega$ (droite de pente $5 \text{ V} \cdot \text{A}^{-1}$) coupe la courbe **e** en un point B correspondant à $I = 1,1$ A et $U = 5,9$ V, donc l'intensité du courant est $I = 1,1$ A.

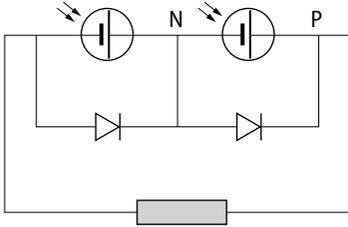
b. $I = 1,1$ A correspond à une tension $U_1 = 9,8$ V pour le panneau recevant un éclairement E_1 . Comme $U = 5,9 \text{ V} = U_1 + U_2$, on a une tension $U_2 = -3,9$ V pour le panneau recevant un éclairement E_2 . On en déduit les puissances mises en œuvre dans chaque panneau :

$$P_1 = 12,0 \text{ W et } P_2 = -4,6 \text{ W.}$$

La puissance totale fournie est donc de 7,4 W.

3. Cette puissance est inférieure à la puissance qui serait fournie par le panneau le mieux éclairé s'il était seul. Le panneau le moins éclairé consomme de l'électricité au lieu d'en produire.

4. a. On branche les deux diodes de la façon suivante :



Si les deux panneaux sont suffisamment éclairés, le courant circule de N vers P.

Si l'un des panneaux manque d'éclairément et que la tension à ses bornes s'annule, le courant produit par l'autre passe par la diode. Tout se passe comme s'il n'y avait que le panneau suffisamment éclairé.

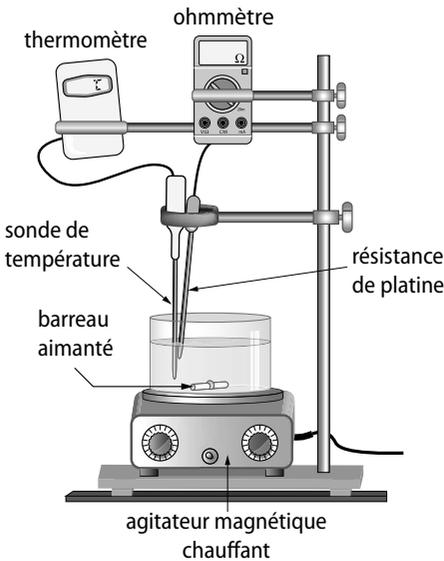
b. Le point de fonctionnement C correspondant est à $I = 1,8 \text{ A}$ et $U = 9,0 \text{ V}$, donc la puissance est :

$$P = 9,0 \times 1,8 = 16 \text{ W.}$$

ÉVALUATION DES COMPÉTENCES EXPÉRIMENTALES

Le thermomètre à résistance de platine p. 157

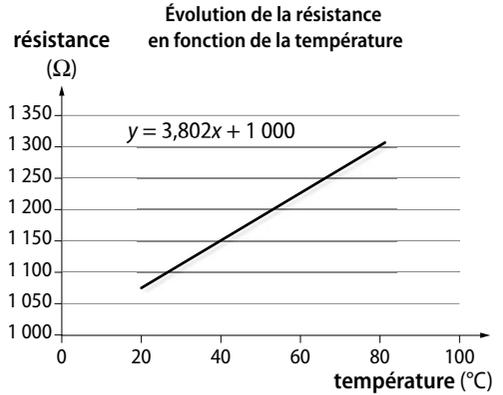
1.



3. Valeurs trouvées pour une sonde platine PT 1000 :

θ (°C)	20,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0
R (Ω)	1 075	1 150	1 180	1 225	1 275	1 300

4.



5. a. $R_0 = 1\,000 \Omega$ et $\alpha = 3,80 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

b. $\Delta\alpha/\alpha = 0,05/3,85 = 1,30 \text{ \%}$.

Membranes, adhésifs et tensioactifs

Le programme

THÈME 3 : Matériaux

Domaines d'étude	Mots-clés
– Structure et propriétés.	– Membranes. – Colles ; adhésifs. – Tensioactifs ; émulsions ; mousses.

Les liens avec l'enseignement spécifique

- Mesure du pH, domaines de prédominance.
- Techniques de séparation et d'extraction en chimie organique.

Évaluation diagnostique p. 160

SITUATION 1

Cette situation vise à faire comprendre ce que sont les membranes, en se basant sur l'étude de leur principale utilisation : les procédés de séparation membranaire. L'**activité 1** présente leur principe de fonctionnement, les différents procédés employés industriellement, les différentes membranes utilisées et met en évidence le caractère novateur et prometteur des technologies membranaires.

SITUATION 2

L'élève doit prendre conscience que, parmi la multitude de colles et adhésifs existants, la majorité est constituée de polymères et met en œuvre des mécanismes d'adhésion universels. L'**activité 2** propose l'étude expérimentale du phénomène de mouillage, indispensable à un bon collage. L'**activité 3** permet à l'élève de fabriquer une colle à base de protéines contenues dans le lait.

SITUATION 3

L'objectif de cette situation est de faire émerger la notion de tensioactif dans une émulsion, dont la mayonnaise est un exemple. La stabilisation du mélange huile-eau est due à la présence d'une petite quantité de tensioactifs.

L'**activité 4** propose l'étude du rôle des molécules tensioactives dans la formation de mousse sous l'angle de la formulation.

Dans l'**activité 3**, on se propose expérimentalement de déstabiliser l'émulsion qu'est le lait, après avoir étudié théoriquement l'origine de sa stabilité.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

La séparation membranaire p. 162

1. Une membrane est une couche mince de matériau poreux et perméable qui sépare deux milieux.
2. a. La semi-perméabilité est la propriété d'une membrane de ne laisser passer que certaines entités chimiques.
b. Cette propriété est due à la taille des pores de la membrane : ils ne laissent passer que les espèces chimiques dont la taille est inférieure à leur diamètre.
3. a. Lors d'une dialyse, la membrane permet de séparer des solutés afin de purifier une solution.
b. On distingue : microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration et osmose inverse.
4. Le traitement de l'eau par filtration membranaire permet d'obtenir une eau très pure, d'une qualité très bonne et constante et sans utiliser de réactifs chimiques. Son seul inconvénient est son coût élevé.
5. Les diamètres des pores d'une membrane sont beaucoup plus faibles que ceux d'un filtre normal, ce qui permet de filtrer des particules dissoutes dans le solvant comme des molécules ou des ions.
6. Une microfiltration permet de filtrer des particules de taille supérieure au micromètre tandis qu'une nano-

filtration permet de filtrer des particules de quelques nanomètres.

7. a. Cette membrane a des pores d'environ $5 \mu\text{m}$ de diamètre ; elle peut donc être utilisée pour un procédé de microfiltration.

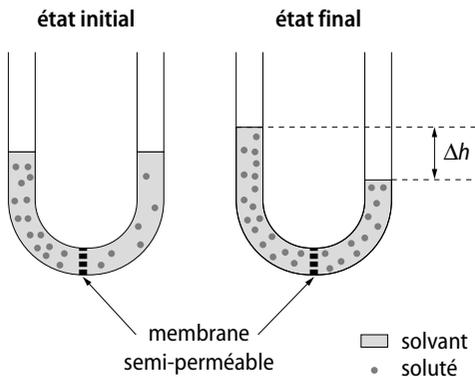
b. Elle ne permet donc pas d'éliminer les bactéries, les virus et les ions nocifs et ne peut donc pas être utilisée pour rendre l'eau potable.

8. a. Seules les membranes en polymère organique ont des pores suffisamment petits pour rendre l'eau potable. En revanche, on utilisera une membrane minérale pour le traitement des solvants du fait de leur grande résistance chimique.

b. Les membranes organiques sont constituées de molécules telles que des polyamides, des polysulfones, ou encore des polymères fluorés : ce sont des polymères.

9. a. L'osmose est la migration spontanée des molécules d'eau à travers une membrane vers les régions plus concentrées en soluté.

b. Mettre dans un tube en U deux solutions de concentrations différentes d'un même soluté, séparées par une membrane : on observe la migration des molécules d'eau du compartiment le moins concentré vers le plus concentré, ce qui se traduit, au bout d'un certain temps, par une différence de niveau de liquide entre les compartiments.



10. La pression osmotique de l'eau de mer est d'environ 25 bars : il faut donc lui appliquer une pression importante, supérieure à 25 bars, pour pouvoir provoquer l'osmose inverse, ce qui a un coût énergétique très élevé.

11. a. Les membranes cellulaires permettent de laisser rentrer les nutriments à l'intérieur de la cellule et d'évacuer les déchets vers l'extérieur.

b. En présence de sel, l'eau contenue dans les cellules de concombre (région peu concentrée en sel) migre vers l'extérieur de la cellule (région très concentrée en sel). Ainsi, les cellules se vident de leur eau, ce qui permet de faire « dégorger » le concombre.

12. On peut citer l'utilisation des membranes pour les dialyses ou les osmose inverses.

ACTIVITÉ 2

Réaliser un bon collage

p. 164

1. a. Une liaison covalente correspond à la mise en commun d'électrons lors de l'association de deux atomes pour former une molécule. Une liaison ionique est de type électrostatique entre les ions présents dans un solide ionique. Les liaisons de van der Waals sont de types électrostatiques entre les nuages électroniques.

b. Les liaisons de van der Waals sont les moins « solides ».

c. Non. Les liaisons physiques, bien que plus faibles, interviennent tout le temps et en grand nombre lors du mouillage : elles peuvent devenir plus importantes que les liaisons ioniques et covalentes (les liaisons chimiques ne sont pas indispensables à l'adhésion).

2. Poncer le matériau permet d'obtenir une rugosité optimale pour favoriser l'adhésion mécanique.

3. Les polymères sont des chaînes de petits molécules, appelées monomères, mises bout à bout en grand nombre (par exemple une dizaine de milliers).

4. Pour avoir un bon mouillage, la goutte doit bien s'étaler : l'angle de contact doit être le plus faible possible (fig. 3), donc le mouillage sera meilleur pour un angle de 10° .

5. a. Non, l'eau ne mouille pas tous les matériaux de la même façon. Par exemple, elle mouille beaucoup mieux le métal que le téflon.

b. L'angle de contact est le plus élevé avec du téflon : c'est donc le matériau avec lequel l'eau a le moins d'affinité.

6. Déposer une goutte de colle sur un matériau et observer le mouillage ; prendre une photo et mesurer l'angle de contact.

7. et 8. La colle s'étale bien sur le verre : le mouillage est bon. L'angle de contact est $\theta = 31^\circ$.

Le mouillage est aussi bon pour le plastique ($\theta = 55^\circ$) ; en revanche il est médiocre avec le métal ($\theta = 85^\circ$) et très mauvais avec le téflon ($\theta = 122^\circ$).

9. On peut donc en conclure que la Super Glue a une bonne adhésion sur le verre et le plastique, une faible adhésion sur le métal et n'adhère pas sur le téflon.

10. La colle séchée adhère bien sur le verre et le plastique, faiblement sur le métal et encore moins sur le téflon. La Super Glue ne permet donc pas de bien coller le téflon.

11. Le téflon, matériau constitué de molécules fluorées, est un anti-adhésif. Le dessus du ruban adhésif est ainsi recouvert de molécules fluorées anti-adhésives pour limiter l'adhésion du dessous collant et donc pour pouvoir le dérouler sans trop d'efforts.

12. Une primaire d'accroche est une couche de matière sur laquelle l'adhésion de la colle est meilleure que sur

le matériau lui-même. Cela permet d'augmenter l'efficacité du collage. On en utilise souvent en peinture.

13. On peut suspendre une masse marquée à chaque assemblage puis comparer les masses minimales nécessaires pour rompre chacun des assemblages. Celui nécessitant la masse la plus élevée sera celui de meilleure qualité.

14. La mesure de l'angle de contact permet de connaître la qualité du mouillage de la colle sur le matériau. Un bon mouillage de la colle est une condition indispensable (même si insuffisante) à un collage de qualité.

ACTIVITÉ 3

Fabriquer une colle à partir du lait

p. 166

1. Lipophile : qui aime les graisses. Cette partie de la molécule se dissout facilement dans les graisses. Hydrophile : qui aime l'eau, se dissout facilement dans l'eau.

2. a. D'après le domaine de prédominance (fig. 2) de la caséine, dans le lait à pH = 6,5 elle est chargée négativement.

b. La caséine permet de créer une émulsion stable de graisse dans l'eau constituant le lait. Sans elle, la phase aqueuse et la phase grasseuse se séparent : le lait caille.

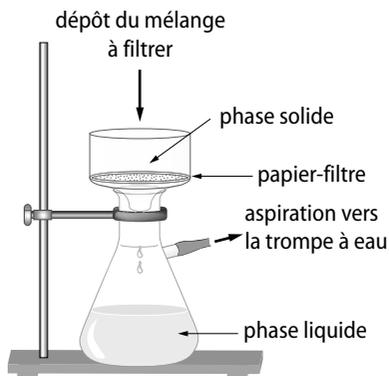
3. a. À pH = 4,6 la caséine devient neutre.

b. La caséine étant devenue neutre, les micelles de graisse et de caséine ne se repoussent plus, coagulent et tombent au fond du bécquet : le lait caille.

c. L'ajout d'acide éthanoïque permet de diminuer le pH de la solution pour faire cailler le lait.

d. La température est un facteur cinétique.

4. Schéma du dispositif de filtration :



5. Après l'ajout d'acide, le caillé contient de la caséine, des graisses, de l'acide éthanoïque et un peu d'eau.

6. D'après le tableau de données physico-chimiques, l'acide éthanoïque et les graisses sont très solubles dans l'acétone, mais pas la caséine : l'ajout d'acétone permet de séparer la caséine des graisses et de l'acide éthanoïque.

7. Après la seconde filtration, la phase solide contient la caséine imbibée d'eau et d'acétone, tandis que la phase liquide contient de l'acétone, des graisses, un peu d'acide éthanoïque et un peu d'eau.

8. On obtient théoriquement :

$$103,4 \times 3,2 \% \times 80 \% = 2,7 \text{ g de caséine.}$$

Lors de l'essai expérimental, nous avons obtenu 2,5 g de caséine (extrait sec). La masse de caséine encore imbibée après 30 min d'étuve est de l'ordre de 5 g.

9. La colle à la caséine est très efficace pour assembler le bois et le carton mais pas le plastique.

10. Le fromage contient la caséine du lait donc, en le mélangeant avec de la chaux, on peut obtenir une colle.

ACTIVITÉ 4

Préparer une mousse

p. 168

1. a. Le trombone flotte à la surface de l'eau.

b. Après ajout de liquide vaisselle, le trombone ne flotte plus et tombe au fond de l'eau.

c. La tension superficielle de l'eau permet de faire flotter le trombone. L'ajout de liquide vaisselle a modifié cette tension superficielle. Ainsi, un tensioactif modifie, « a une action sur », la tension superficielle.

2. a. Le liquide vaisselle a permis de diminuer la tension superficielle de l'eau : celle-ci n'est ainsi plus suffisante pour compenser le poids du trombone et celui-ci coule.

b. En abaissant la tension superficielle de l'eau, le tensioactif permet d'étirer d'avantage la surface de l'eau de façon stable, ce qui permet la formation de bulles et ainsi de mousse.

3. a. La moussabilité est la quantité de mousse formée dans des conditions données.

b. Prendre deux solutions et les faire mousser (par agitation par exemple) puis comparer la quantité de mousse formée.

4. Plus une mousse perdurera dans le temps (plus ses bulles mettront de temps avant d'éclater), plus elle sera stable.

5. D'après le tableau de la figure 4, plus la chaîne est longue, plus la moussabilité est faible.

6. a. D'après le tableau de la figure 5, la moussabilité augmente avec la concentration en tensioactif (hormis pour T_2). Ceci est vrai jusqu'à une concentration limite appelée Concentration Micellaire Critique (CMC) au-delà de laquelle la quantité de mousse formée diminue légèrement quand la concentration augmente ; mais ce n'est pas l'objet de l'activité.

b. Le tensioactif le plus moussant est T_1 .

7. a.	C (%)	Hauteur de mousse formée (mm)			Stabilité moussante %	
		0 min	10 min	30 min	10 min	30 min
T ₁	0,025	180	174	174	97	97
	0,10	185	168	162	91	88
	0,25	210	197	194	94	92
T ₂	0,025	18	13	13	72	72
	0,10	165	82	38	50	23
	0,25	155	108	36	70	23
T ₃	0,025	156	7	0	4	0
	0,10	190	8	0	4	0
	0,25	195	8	0	4	0
T ₄	0,025	51	5	1	10	2
	0,10	159	15	5	9	3
	0,25	205	32	9	16	4

b. D'après le tableau précédent, la mousse la plus stable est obtenue à partir d'une solution de T₁ à 0,025 % en masse.

c. Les résultats précédents ne permettent pas de conclure concernant l'influence de la concentration en tensioactif sur la stabilité.

8. On pourra choisir une solution de T₁ à 0,25 % en masse pour obtenir une grande quantité de mousse stable.

9. La mousse subit un drainage de l'eau vers le bas sans modification structurelle, puis se casse subitement en grande quantité : on peut se poser la question du choix de l'origine des temps lors de la mesure de la stabilité. Doit-on prendre cette origine dès le début de l'expérience, ou au moment où la mousse commence à se casser ?

10. Une augmentation de température pourrait favoriser l'éclatement des bulles, ainsi que le drainage. Pour le vérifier, il conviendrait de faire le test de Ross-Miles avec une même solution de tensioactif, à des températures différentes, en utilisant des bains thermostatés.

11. L'étude des solutions tensioactives permet de prévoir la quantité de mousse formée ainsi que sa stabilité. On peut ainsi choisir le tensioactif le mieux adapté pour obtenir des mousses ayant des propriétés recherchées. C'est un outil indispensable pour la formulation des mousses.

EXERCICES

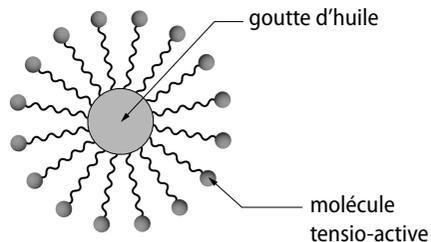
COMPÉTENCE : Analyser des documents scientifiques

1 Graphiquement, le seuil de coupure est de $10^5 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$. Ainsi, après l'ultrafiltration, le mélange ne contiendra plus que l'hémoglobine, les autres molécules ne passant pas à travers les pores de la membrane.

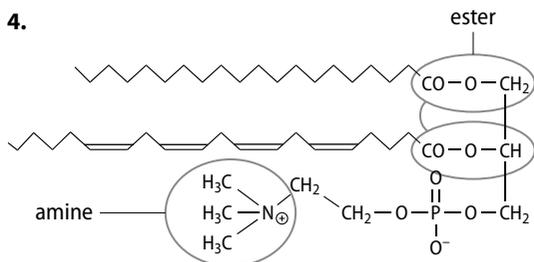
2 A. 1. L'eau présente dans la mayonnaise provient du jaune d'œuf et de la moutarde.

2. Il faut agiter énergiquement pour disperser les molécules d'huile dans l'eau.

3. Micelle d'huile dans l'eau :



4.



5. a. D'après le tableau « Composition pour 100 g », un jaune d'œuf est constitué de 34,4 % de lipides, parmi lesquels 25 % sont de la lécithine d'après l'énoncé. Donc un jaune d'œuf de 20 g contient :

$$20 \times (34,4/100) \times (25/100) = 1,7 \text{ g de lécithine.}$$

b. D'après la photographie, la taille des gouttelettes d'huile est comprise entre 1 et 10 μm , donc d'après le tableau la mayonnaise est une macro-émulsion. Ceci est en accord avec le fait que la mayonnaise est opaque et préparée par une « agitation mécanique vigoureuse ».

c. Puisqu'un jaune d'œuf contient environ 1,7 g de lécithine, il permet de préparer, d'après le modèle simplifié, proposé par l'énoncé, 1,7 kg de mayonnaise.

d. L'huile étant introduite en grande quantité et la lécithine permettant d'obtenir une grande quantité de mayonnaise, l'eau est le facteur limitant la quantité de mayonnaise pouvant être obtenue.

e. Ainsi, il convient de rajouter de l'eau, par exemple grâce à la moutarde.

B. 1. Les blancs en neige étant constitués d'air dispersé dans un liquide, ils constituent une mousse.

2. On en déduit que l'ovalbumine est un tensioactif.

3. Les blancs d'œufs contiennent un tensioactif, donc ils peuvent être utilisés pour obtenir une émulsion : il est donc possible d'obtenir une mayonnaise à partir de blancs d'œufs.

C. 1. Il est possible de réaliser une mayonnaise sans œuf. Dans le cas de l'aioli, les tensioactifs nécessaires à l'émulsion sont apportés par l'ail.

2. Le mortier permet de broyer les cellules d'ail pour qu'elles libèrent les molécules tensioactives qu'elles contiennent.

3. Les cellules d'oignon et d'échalote contiennent aussi des protéines et phospholipides ayant des propriétés tensioactives : il est donc tout à fait possible de réaliser une mayonnaise à base d'oignon ou d'échalote.

3 1. La microfiltration est utilisée pour la clarification et la stabilisation microbiologique du vin.

2. Ce procédé préserve la qualité du vin tout en ayant un fonctionnement automatique et continu, avec réduction des pertes et des rejets polluants.

3. a. Tout au long du fonctionnement, les particules filtrées s'accumulent sur la membrane et bouchent ainsi ses pores : on parle de colmatage.

b. Une membrane colmatée laisse passer un débit de vin moins important. Le colmatage diminue les performances du procédé.

4. Pour diminuer le colmatage, on utilise la rétrofiltration.

5. a. La rétrofiltration consiste à inverser le flux passant à travers la membrane pendant un court instant, et de façon périodique, pour déboucher les pores de la membrane et diminuer le colmatage.

b. D'après la courbe, le débit de filtration avec rétrofiltration est bien supérieur à celui obtenu sans rétrofiltration au bout d'un temps donné. Par ailleurs, d'après le tableau de valeurs, la rétrofiltration permet de traiter des débits deux à trois fois plus importants que le procédé sans rétrofiltration. On en conclut que la rétrofiltration est vraiment efficace.

6. a. Volume traité = débit · temps · surface
 $= 95 \times 0,50 \times 0,5000 = 24 \text{ L}$

avec rétrofiltration.

b. Sans rétrofiltration, le volume serait :

$$24 \times 31/95 = 7,8 \text{ L.}$$

c. Le vin rouge contient plus de particules en suspensions (tanins) que le vin blanc ; ainsi le colmatage est toujours moindre dans le cas du vin blanc, ce qui conduit à des débits traités toujours supérieurs à ceux du vin rouge.

COMPÉTENCE : Pratiquer une démarche expérimentale

4 1. Formule brute du DGEBA : $C_{21+18n}H_{24+20n}O_{4+3n}$
 Masse molaire :

$$M = (21 + 18n) \times 12 + (24 + 20n) \times 1 + (4 + 3n) \times 16 = 340 + 284n \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}.$$

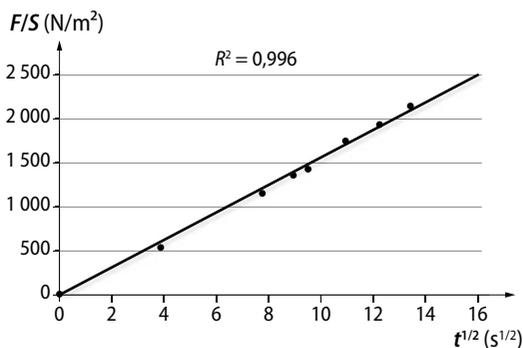
2. Suspendre l'assemblage par une extrémité, et accrocher une masse connue (par exemple un récipient de masse connue contenant des grains de sable ou de riz) à l'autre extrémité. Augmenter la masse en ajoutant des grains de riz jusqu'à la rupture du joint de colle.

3. On calcule la force par unité de surface F/S en remarquant que la force exercée sur l'assemblage est égale au poids de la masse suspendue, soit $F = m \cdot g$ avec m en kg. On peut convertir également la surface en m^2 .

t (s)	0	15	60	80	90	120	150	180
m (g)	0	55	165	222	262	287	237	352
S (cm^2)	0	10	14	16	18	16	12	16
F/S (N/m^2)	0	539	1 155	1 360	1 426	1 758	1 936	2 156
$t^{1/2}$ ($\text{s}^{1/2}$)	0	3,9	7,7	8,9	9,5	11,0	12,2	13,4

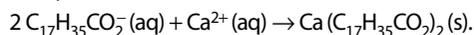
Les joints de colle réalisés n'ont pas tous la même surface. Pour pouvoir les comparer, il faut donc ramener les mesures de forces à l'unité de surface : pour cela, on calcule F/S , la force par unité de surface.

4. On peut supposer que la résistance mécanique du joint de colle est proportionnelle à la distance de pénétration du polymère de colle dans celui du matériau à coller. Ainsi, la loi sera vérifiée si la force nécessaire pour causer la rupture de l'assemblage est proportionnelle à $t^{1/2}$. Pour vérifier cette loi, traçons le graphe $F/S = f(t^{1/2})$.



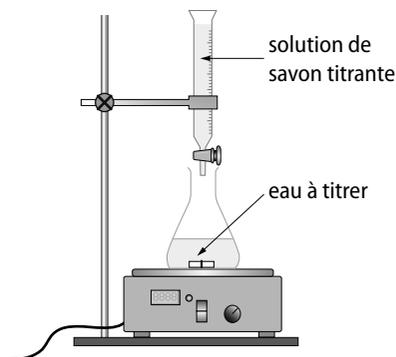
La courbe obtenue est une droite qui passe par l'origine, donc les résultats de l'expérience sont bien en accord avec la loi proposée.

5 1. Équation de réaction :



2. D'après l'énoncé et l'équation précédente, le stéarate de sodium précipite en présence d'ions calcium. Les molécules tensioactives ne sont donc plus présentes en solution et il n'est donc plus possible de former de la mousse. Le savon ne mousse donc plus en présence d'ions calcium.

3.



4. $[Ca^{2+}] = (1/2) c \cdot V_{\text{éq}}/V_0$
 $[Ca^{2+}] = 0,5 \times 0,12 \times 2,3/50 = 2,8 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$
 $= 28 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} = 28 \text{ °fH.}$

5. L'eau est donc dure.

6 1. Unité de R :

$\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}.$

2. La pression osmotique est égale à la pression hydrostatique : $\Pi = \rho \cdot g \cdot h = 1,0 \times 10^3 \times 9,81 \times 0,15 \approx 1,5 \times 10^3 \text{ Pa.}$

3. La solution contient deux ions, donc :

$C = \Pi/(2 \cdot R \cdot T) = 1,5 \times 10^3/(2 \times 8,314 \times 293)$
 $= 0,30 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3} = 3,0 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$

4. a. Pour $(Na^+ (aq) + Cl^- (aq)),$

$C_m = 30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} = 30 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} ; M = 58 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} ;$

$\Pi = 2 \cdot R \cdot T \cdot C_m/M = 25,2 \times 10^5 \text{ Pa} = 25,2 \text{ bar.}$

b. $h = \Pi/(\rho \cdot g) = 249 \text{ m.}$

c. Il est donc impossible de réaliser cette expérience avec de l'eau de mer.

COMPÉTENCE : Résoudre des problèmes scientifiques

7 1. a. Les liquides ont tendance à remonter le long d'un tube très fin du fait de la tension superficielle du liquide qui s'oppose à la gravité. La capillarité est d'autant plus marquée que le diamètre du tube est faible (on parle de capillaire). C'est ce qui explique qu'un buvard ou un sucre trempé dans l'eau s'imbibe.

b. Les tensioactifs diminuent la tension superficielle, ce qui se traduit par une diminution des effets capillaires.

2. Les tensioactifs permettent d'obtenir une émulsion d'eau dans le pétrole.

3. a. Pour des concentrations en tensioactifs inférieures à la CMC, une augmentation de la concentration induit une baisse significative de la tension superficielle. Au-delà de la CMC, la tension superficielle n'évolue plus avec la concentration en tensioactif.

b. La CMC est la concentration à partir de laquelle les molécules de tensioactifs s'agglomèrent entre elles pour former des micelles au sein de la solution. Tout

ajout supplémentaire de tensioactif ne modifie plus la tension superficielle car l'interface est déjà saturée en molécules tensioactives.

c. La CMC correspond à la concentration optimale de tensioactif à utiliser pour abaisser la tension superficielle. Dépasser la CMC revient à du « gaspillage de tensioactif » induisant des surcoûts énormes au regard des quantités gigantesques de pétrole mises en jeux.

4. a. 10 % du pétrole extrait annuellement nécessitent l'utilisation de tensioactifs, soit 3 milliards de barils :

$477 \times 10^9 \text{ L.}$

b. Cela correspond à l'utilisation de :

$477 \times 10^{10} \text{ g} = 4,77 \times 10^6 \text{ tonnes}$

de tensioactifs annuellement.

c. Une augmentation de seulement 1 % de la concentration d'utilisation des tensioactifs induit une surconsommation de l'ordre de 5×10^4 tonnes, entraînant un important surcoût de production. Il est ainsi très important d'étudier la CMC des tensioactifs pour maîtriser les coûts de production de l'industrie pétrolière.

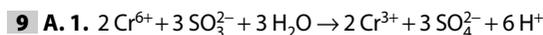
8 1. Plus l'angle de contact est faible, plus la colle mouille le matériau et meilleur est le collage : $\theta = 15^\circ.$

2. Lors d'un mouillage parfait, la goutte de colle s'étale totalement : $\theta = 0^\circ.$

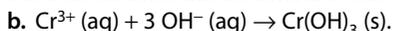
3. $\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cdot \cos \theta$ (relation de Young-Dupré).

4. a. $\cos \theta = (\gamma_{SV} - \gamma_{SL})/\gamma_{LV} = (31 - 41)/44 = -0,23$ d'où $\theta = 103^\circ$: mauvais mouillage, adhésion non satisfaisante.

b. $\cos \theta = (\gamma_{SV} - \gamma_{SL})/\gamma_{LV} = (500 - 456)/44 = 1,00$ d'où $\theta = 0,00^\circ$: mouillage parfait, très bonne adhésion.



2. a. La précipitation permet de séparer les ions Cr^{3+} présents en solution afin de diminuer leur concentration.



3. Non : d'après le tableau, la concentration en ion Cr^{3+} après traitement chimique est très largement supérieure aux normes en vigueur.

B. 1. Ces trois procédés diffèrent par la taille des pores des membranes utilisées, ce qui conduit à des spectres de filtration différents.

2. Taux de rétention :

Concentration Cr^{6+} initiale ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Concentration Cr^{6+} perméat ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Rétention %
5	0,01	99,8
25	0,1	99,6
50	1,2	97,6
100	7,8	92,2
500	58,6	88,28
1 000	150	85

Le taux de rétention, donc aussi l'efficacité, diminue lorsque la concentration en ions Cr^{6+} augmente.

3. Les eaux usées de chromage ont une concentration en ions Cr^{6+} de l'ordre de $1\,000\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ à la fin du traitement chimique, conduisant après traitement par osmose inverse à un perméat de concentration supérieure à $150\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, ce qui est encore bien au-dessus des normes en vigueur : le traitement n'est toujours pas satisfaisant.

4. Le procédé est vraiment efficace pour des concentrations en ions Cr^{6+} inférieures à $50\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

C. 1. Ce procédé met en œuvre trois étages d'osmose inverse en série. À chaque étage, on réinjecte le rétentat obtenu à la solution à traiter à l'étage précédent, tandis que le perméat est traité par l'étage suivant.

2. L'intérêt est d'augmenter les performances du procédé.

3. Taux de rétention = $(1\,000 - 0,09)/(1\,000 \times 100) = 99,99\%$.

4. Oui, les eaux traitées à l'issue de ce procédé ont une concentration en ions Cr^{6+} d'environ $0,1\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, inférieure à $1\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

10 1. Nombre de poils = nombre de soies/nombre soies par poil = $2 \times 10^9/800$.

Le gecko possède $5\,000\text{ poils}/\text{mm}^2$, ainsi la surface de ses doigts est :

$$(2 \times 10^9/800)/5\,000 = 500\text{ mm}^2 = 5\text{ cm}^2,$$

ce résultat est réaliste.

2. Les interactions de van der Waals sont des forces de nature électrostatique.

3. Les soies du gecko exercent une force :

$$F = 2 \times 10^9 \times 20 \times 10^{-9} = 40\text{ N},$$

ce qui équivaut au poids d'une masse :

$$m = F/g \approx 4\text{ kg}.$$

Ainsi, le gecko peut supporter une masse de 4 kg avant de se décrocher.

4. Il est difficile d'accrocher une masse de 4 kg sur un animal de 300 g !

5. Dans la première réaction, la polycondensation s'effectue entre deux molécules : elle est donc intermoléculaire ; tandis que dans la deuxième réaction, la polycondensation s'effectue au sein d'une même molécule : elle est intramoléculaire.

6. Dans la molécule B, on reconnaît deux groupes d'atomes caractéristiques de la fonction amine ; dans la molécule C, deux groupes caractéristiques des acides carboxyliques et une fonction amide.

ÉVALUATION DES COMPÉTENCES EXPÉRIMENTALES

Mesure de la CMC d'un tensioactif par conductimétrie

p. 175

1. a. La masse de SDS est :

$$m = n \cdot M = c_0 \cdot V \cdot M = 0,04 \times 100 \times 10^3 \times 288 = 1,15\text{ g}.$$

b. Voir fiche pratique 11, page 218.

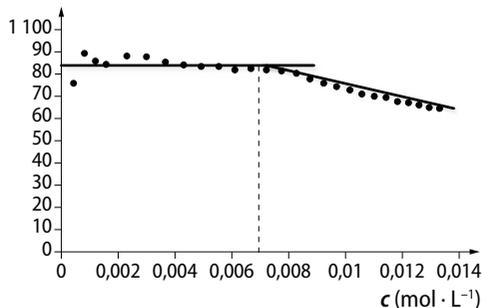
$$6. \quad c = c_0 \cdot V/(V + V_{\text{eau}}).$$

7.

Évolution de la conductivité molaire lors d'ajout de SDS

Conductivité molaire

($\times 10^3\text{ mS} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^2$)



8. $\text{CMC} = 0,0065\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} = 6,5\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ estimée graphiquement.

9. L'écart relatif vaut $(7 - 6,5)/7 = 0,07 = 7\%$: la valeur expérimentale est proche de la valeur théorique.

Nouveaux matériaux

Le programme

THÈME 3 : Matériaux

Domaines d'étude	Mots-clés
– Nouveaux matériaux.	– Nanotubes ; nanoparticules. – Matériaux nanostructurés. – Matériaux composites. – Céramiques ; verres. – Matériaux biocompatibles ; textiles innovants.

Les liens avec l'enseignement spécifique

- Période et amortissement d'un oscillateur mécanique.
- Chaîne de transmission d'informations.

Évaluation diagnostique

p. 178

SITUATION 1

L'objectif de cette situation est de revenir sur les différentes structures microscopiques de la matière condensée. Un matériau amorphe présente une structure microscopique désordonnée. C'est le cas notamment des verres étudiés dans les **activités 1 et 5**. Les matériaux semi-cristallins présentent des zones amorphes décrites précédemment, et des zones cristallines issues d'un agencement régulier des entités qui les composent.

SITUATION 2

Cette situation vise à revoir la définition des nanoparticules : ce sont des entités dont l'une des dimensions au moins est inférieure ou égale à 100 nm.

Les **activités 2 et 3** proposent une étude approfondie de quelques objets de la nanotechnologie.

SITUATION 3

L'objectif est ici d'initier les élèves aux contraintes de résistance mécanique des matériaux pour certaines applications industrielles. En effet, les pales d'éoliennes doivent être légères, résistantes à la déformation, à la corrosion et à l'érosion (pour les éoliennes offshore), aux vibrations et à la fatigue. Les fibres ont pour rôle

de renforcer la matrice époxyde et conférer ainsi aux pales toutes les propriétés mécaniques nécessaires.

L'**activité 4** propose une étude approfondie des matériaux composites.

ACTIVITÉS

ACTIVITÉ 1

Les céramiques et les verres

p. 180

Dans cette activité, le mot verre désigne uniquement les verres minéraux, à l'exclusion des verres organiques et métalliques, moins connus du « grand public ».

1. a. Les matières premières des céramiques sont de trois sortes : les matières premières naturelles brutes (argiles, roches), les matières naturelles purifiées et les matières premières synthétiques.

b. D'après l'échelle donnée dans la figure 1 du document 2, un grain de poudre de céramique mesure environ 100 nm.

2. a. Les céramiques sont généralement mises en forme par frittage.

b. Pour mettre en forme un matériau par moulage, il faut le mettre dans un moule à l'état liquide. Or, la température de fusion des céramiques est extrêmement élevée (supérieure à 2 000 °C), on utilise donc un autre moyen de mise en forme.

c. La valeur élevée des températures de fusion des céramiques provient de la nature des liaisons chimiques qui s'y rencontrent : liaisons covalentes et liaisons ioniques, toutes deux très fortes.

d. Les céramiques frittées sont en fait un agglomérat de grains de poudre « collés » par endroits sous l'effet de la chaleur. Il reste donc de l'air entre les grains de poudre, ce qui explique la porosité de ces matériaux (fig. 1).

3. a. Pour pouvoir être implanté sans danger dans l'organisme, un matériau doit être inerte chimiquement afin de ne pas réagir avec les substances qui peuvent entrer en contact avec lui dans le corps ; il doit également avoir une bonne tenue à l'usure pour assurer ses fonctions mécaniques ; et enfin, il doit être « accepté » par l'organisme donc ne pas présenter de signes de rejet (infections ou autre) par celui-ci.

b. Les céramiques sont inertes chimiquement, peuvent avoir une composition proche de celle des tissus osseux et ont une résistance à l'usure et au frottement très élevée. Elles sont également bien tolérées par l'organisme, et peuvent donc servir pour les implants biologiques.

4. a. Le verre est un matériau inorganique et non métallique, c'est donc une céramique. C'est en fait un mélange d'oxydes.

b. Un solide amorphe est un solide dont les molécules ne sont pas disposées dans un ordre précis mais désordonné, contrairement aux solides cristallins.

c. Pour faire varier les propriétés d'un verre, on ajoute différentes molécules dans la matrice de silice.

d. Un verre silicosodocalcique contient de la silice (SiO_2 provenant du sable), des ions sodium et calcium (provenant des carbonates de sodium et calcium), d'où son appellation.

5. a. Le passage de l'état liquide à l'état solide se fait progressivement, sur une plage de température importante. Durant cette transition, le verre devient de plus en plus visqueux.

b. Il s'agit de la transition vitreuse.

c. L'eau passe à l'état solide à une température fixe de 0°C à la pression atmosphérique, de manière non progressive (il n'y pas de fluide visqueux intermédiaire entre l'eau et la glace) : tant que toute l'eau ne s'est pas solidifiée, le mélange eau/glace reste à la température de 0°C .

6. a. D'après le graphique du document 6, il faut élever les bouteilles à une température comprise entre $1\ 080^\circ\text{C}$ et $1\ 350^\circ\text{C}$ environ.

b. À très haute température (supérieure à $1\ 600^\circ\text{C}$), la viscosité est très faible, d'après le graphique. En effet, le verre y est liquide et très peu visqueux. Lorsque la température diminue, le verre devient progressivement de plus en plus visqueux : sa viscosité augmente progressivement lorsque la température diminue. C'est ce qu'on observe sur le graphique.

7. Selon leur composition chimique, les céramiques peuvent être inertes chimiquement, résister à de très hautes températures et à des contraintes mécaniques importantes.

8. Un verre est une céramique qui présente un état solide amorphe obtenu par refroidissement. Ce solide est obtenu par passage par une transition vitreuse.

ACTIVITÉ 2

Matériaux nanostructurés et textiles innovants

p. 182

1. Les nanomatériaux peuvent être classés en matériaux nanostructurés en surface ou en volume, et en nanocomposites.

2. a. Les nanocapsules de médicaments sont des matériaux nanostructurés en volume.

b. Les résines époxy renforcées en nanotubes de carbone sont des nanocomposites.

c. Les fibres des vêtements thermochromes sont des matériaux nanostructurés en surface.

3. Une nanocapsule est une capsule (sphère) de dimension nanométrique.

4. Les nanoparticules sont soupçonnées avoir des effets néfastes sur l'environnement et sur l'organisme qui peuvent survenir par application cutanée (crèmes), par ingestion (alimentation) ou par inhalation. Ces effets ne sont toutefois pas encore clairement démontrés.

5. a. Pour les textiles innovants, les nanocapsules sont remplies d'un principe actif puis fixées aux fibres textiles.

b. Les nanocapsules doivent conserver le principe actif :
– temporairement dans le cas de principes actifs qui doivent être libérés pour agir (principe hydratant, amincissant...),

– durablement dans le cas où le principe actif doit rester sur le vêtement (substance thermochrome, capteurs de température, de déformation...).

c. Les nanocapsules se brisent par frottement des fibres du vêtement. Dans les cas où le principe actif doit être libéré par diffusion (c'est le cas des vêtements odorants), la brisure des capsules n'est pas souhaitée mais celles-ci doivent se vider lentement. Dans les cas où le principe actif doit être libéré par cassure des capsules (vêtements amincissants ou hydratants), la brisure des nanocapsules est souhaitable mais elle doit être progressive. En effet, il serait gênant que toutes les capsules se brisent lors des premières minutes de port du vêtement. Dans les cas où le principe actif doit être conservé dans les capsules (vêtements thermochromes, intelligents), leur brisure n'est pas souhaitée.

d. Les lavages réduisent le nombre de capsules restantes car ils génèrent des frottements de la fibre textile, donc la rupture des capsules.

6. a. Les nanocapsules sont remplies du principe actif médicamenteux puis administrées au patient.

b. Les nanocapsules doivent conserver le principe actif et le conduire à la cellule malade.

c. Les nanocapsules se brisent dans des conditions chimiques particulières, donc dans un environnement biologique bien précis. Leur rupture n'est souhaitable que dans la zone à traiter. En dehors de cette zone, les capsules doivent rester intactes.

d. La dose de médicament à administrer au patient dans le cas de nanomédicaments est juste celle suffisante pour guérir la maladie, alors que dans le cas des médicaments traditionnels, une certaine quantité de principe actif est détruite par les enzymes : la dose à administrer afin de guérir le patient doit donc être supérieure à la dose nécessaire.

La formulation du nanomédicament peut être plus spécifiquement adaptée à la maladie car celui-ci est directement mis en présence de la zone à traiter et n'a pas toute les étapes biologiques à franchir, contrairement aux médicaments traditionnels.

7. Parmi les textiles innovants, on retrouve les textiles à base de fibres nouvelles, les textiles sensibles et les textiles intelligents.

8. a. La fibre optique est une fibre nouvelle. Un vêtement en fibres optiques est donc un textile à base de fibres nouvelles. S'il est en plus doté d'un système électronique qui lui permet d'éclairer les fibres dans l'obscurité, il devient en plus intelligent.

b. La substance autobronzante est encapsulée. Les capsules doivent être brisées par frottement donc sensibles à une contrainte mécanique extérieure. Il s'agit donc d'un textile sensible.

c. Un tel vêtement est « intelligent » car il établit une communication entre le corps du patient et l'extérieur via un système électronique.

9. Les matériaux nanostructurés sont utilisés en médecine dans le cadre de traitement des maladies notamment et dans les textiles innovants.

10. Les nanocapsules contenant un médicament doivent être biocompatibles, c'est-à-dire pénétrer dans l'organisme sans générer de réaction de rejet, et biodégradables, c'est-à-dire dégradables sous certaines conditions biologiques afin de mener le principe actif à bon port. Les nanocapsules utilisées dans les textiles doivent également être biocompatibles en ne générant pas de réaction cutanée, allergène notamment.

ACTIVITÉ 3

Les nanotubes de carbone

p. 184

1. a. Un fil de couture doublé est moins cassant qu'un fil simple.

b. Lorsqu'on applique une force croissante, le fil simple cassera pour une force plus petite que le fil doublé.

c. Pour avoir une bonne résistance mécanique, un matériau doit résister à une force importante sans se rompre.

2. a. Pour une même intensité de force appliquée, l'allongement du ressort de très faible raideur est beaucoup plus grand que celui du ressort de grande raideur.

b. Le ressort de grande raideur est plus solide.

c. Pour avoir une bonne résistance mécanique, un matériau doit avoir une grande « raideur », c'est-à-dire qu'il doit peu se déformer pour une force appliquée importante.

3. a. On prend des échantillons de même dimension et de matériaux différents que l'on tord suivant la même orientation. L'angle de torsion pour lequel le matériau rompt donne une mesure de sa flexibilité. Plus l'angle à la rupture est élevé, plus le matériau est flexible.

b. Dans les nanotubes de carbone, dans la zone de flexion, les atomes peuvent se réarranger suivant des pentagones et heptagones, ce qui permet de supporter la flexion locale.

4. a. Un matériau de faible densité et solide sera avantageusement utilisé dans des domaines où la légèreté est un atout : aérospatiale, équipements sportifs...

b. La densité des nanotubes de carbone est presque 3 fois plus faible que celle de l'aluminium (elle-même presque 3 fois plus faible que celle de l'acier). Ils présentent donc un avantage certain en termes de légèreté.

5. a. La dimension du module de Young est une force par unité de surface. La pression s'exprime dans une dimension analogue.

b. D'après la question 2, un matériau solide doit peu se déformer pour une contrainte importante, donc le module de Young doit être élevé.

c. Le module de Young des nanotubes de carbone est presque 6 fois plus élevé que celui de l'acier. Les nanotubes de carbone sont donc beaucoup plus solides de ce point de vue là.

6. La « contrainte à la rupture » est la contrainte à appliquer à l'échantillon de matériau pour le rompre. Elle correspond à l'ordonnée du point de rupture sur la courbe contrainte-déformation.

7. a. Pour avoir une grande ténacité, un matériau doit présenter une grande aire sous sa courbe contrainte-déformation. Il faut pour cela que son module de Young soit le plus élevé possible, et que la zone plastique soit la plus étendue possible.

b. Les nanotubes de carbone ont un module de Young très élevé et ils présentent en plus la capacité de réarrangements internes des liaisons de carbone, ce qui leur confère la possibilité de se déformer sans se casser : ils ont donc également une zone de plasticité importante. Ces deux propriétés des nanotubes de carbone expliquent leur ténacité record.

8. La direction des nanotubes dans la matrice joue un rôle très important et les propriétés mécaniques de la matrice également.

9. L'atome de carbone peut se lier suivant des pentagones, hexagones, heptagones ; il permet donc un réarrangement spatial local des nanotubes, ce qui confère aux nanotubes de carbone des propriétés mécaniques très intéressantes.

10. Les performances mécaniques des nanotubes de carbone peuvent être quantifiées par :

- leur densité, qui caractérise la « légèreté » d'un matériau ;
- leur module de Young, qui caractérise l'élasticité d'un matériau ;
- leur contrainte à la rupture, qui caractérise la contrainte (force par unité de surface) qu'ils peuvent supporter avant rupture ;
- leur ténacité, qui caractérise la capacité d'un matériau à absorber les chocs.

ACTIVITÉ 4

Les matériaux composites

p. 186

1. a. Un béton armé doit pouvoir supporter un poids très élevé, assurer une isolation thermique et phonique, supporter des vibrations légères, être stable dans le temps... Un matériau composite utilisé dans l'aéronautique doit être léger, solide et supporter des différences de pression et de températures importantes... Un matériel d'équipement sportif doit supporter des chocs importants, résister aux vibrations, être le plus léger possible...

b. Le béton armé allie une céramique (ciment) à un métal (acier) ; le composite présenté, utilisé en aéronautique, allie un polymère (époxy généralement) et une céramique (fibres de carbone) ; le composite présenté, utilisé en équipement sportif, allie un métal à une céramique.

c. La nature de la matrice et du renfort qui constituent le composite a un impact important sur ses propriétés (densité, résistance à des contraintes plus ou moins élevées...).

2. Les exigences vis-à-vis des matériaux de grande diffusion sont infimes par rapport à celles des matériaux de l'aéronautique.

a. Les fibres de carbone doivent donc certainement avoir des propriétés plus intéressantes d'un point de vue mécanique que les fibres de verre.

b. Les fibres continues doivent également être plus efficaces que les fibres courtes.

c. La charge en renfort joue également un rôle important : plus un composite est chargé en renfort, plus il est résistant.

3. a. Le diamètre du filament est le diamètre de la section de la fibre. La masse volumique est le rapport de la masse sur un volume donné de fibre. Le module de Young représente l'élasticité de la fibre. La contrainte de

rupture représente la contrainte en traction que peut supporter la fibre avant rupture.

b. Le diamètre du filament influence la quantité de fibres que l'on pourra introduire dans le matériau : plus le filament est fin, plus on pourra en mettre pour une forme finale de composite donnée. La masse volumique influe sur la légèreté du matériau composite final. Le module de Young et la contrainte à la rupture ont une conséquence directe sur la résistance mécanique du matériau composite (voir **activité 1**).

c. Pour choisir une fibre de renfort, il faut analyser entre autres la dimension transversale, la masse volumique et la résistance mécanique de la fibre.

4. a. Un renfort peut être sous forme de charges ou de fibres (courtes, longues ou continues).

b. La structure continue apporte la meilleure tenue mécanique. Elle ne doit pas être tissée de manière trop serrée.

5. a. Exemples et applications de certains composites : le béton armé utilisé dans le bâtiment, les composites à matrice époxy renforcée en fibres de carbone utilisés dans l'aéronautique, ceux à matrice métallique renforcée en fibres de carbone utilisés dans l'équipement sportif.

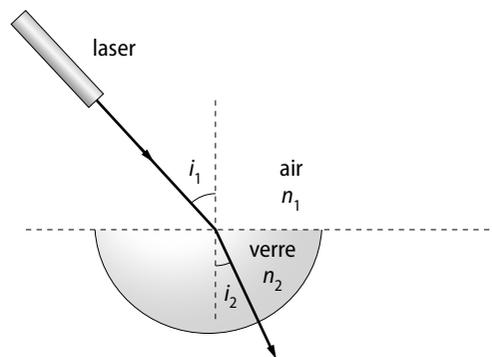
b. Les propriétés du composite dépendent de celles de la matrice et du renfort, de la structure du renfort et de sa proportion dans la matrice.

ACTIVITÉ 5

Principe de la fibre optique

p. 188

1. On peut schématiser le montage expérimental comme ci-dessous, en notant i_1 l'angle d'incidence et i_2 l'angle de réfraction :



2.

i_1 (°)	5	10	15	20	25	30	35	40	45
i_2 (°)	3	7	10	13	16	19	22	25	28

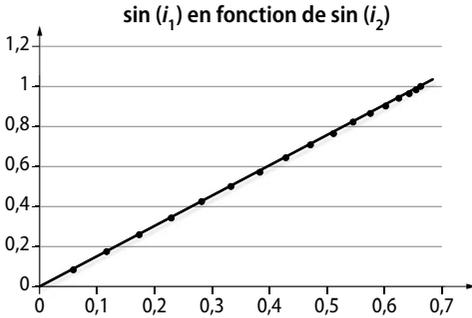
i_1 (°)	50	55	60	65	70	75	80	85
i_2 (°)	31	33	35	37	39	40	41	42

3. a.

$\sin(i_1)$	0,087	0,174	0,259	0,342	0,423	0,500	0,574	0,643
$\sin(i_2)$	0,058	0,116	0,173	0,228	0,282	0,333	0,382	0,429

$\sin(i_1)$	0,707	0,766	0,819	0,866	0,906	0,940	0,966	0,985	0,996
$\sin(i_2)$	0,471	0,511	0,546	0,577	0,604	0,626	0,644	0,657	0,664

b.

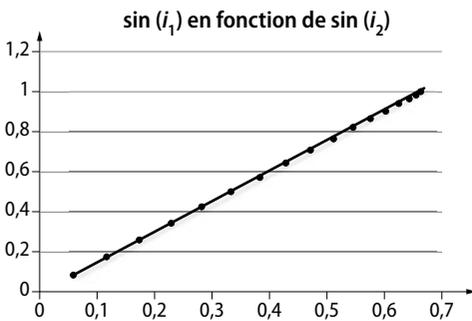


c. La courbe représentant $\sin(i_1)$ en fonction de $\sin(i_2)$ est une droite passant par l'origine, donc $\sin(i_1)$ est proportionnel à $\sin(i_2)$.

4. Le milieu 1 est l'air et le milieu 2 est le verre.

5. a. Cette loi est bien cohérente avec la question 3.c car elle permet d'écrire que $\sin(i_1) = (n_2/n_1) \cdot \sin(i_2)$ donc $\sin(i_1)$ est proportionnel à $\sin(i_2)$ avec n_2/n_1 comme coefficient de proportionnalité.

b.



On a donc $\sin(i_1) = 1,5 \times \sin(i_2)$.

c. Le coefficient de proportionnalité vaut $n_2/n_1 = 1,5$ donc l'indice optique du verre utilisé vaut :

$$n_2 = 1,5 \times n_1 = 1,5 \times 1,00 = 1,5.$$

6. On calcule $n_{\text{verre}} = n_{\text{moy}} \pm \Delta n$ avec n_{moy} la moyenne des valeurs trouvées et Δn le double de l'écart-type de la distribution (fiche méthode 3, p. 200).

7. a. Lorsque le faisceau lumineux passe de l'air au verre, il s'approche de la normale à la surface de séparation.

b. « Lorsqu'un faisceau lumineux passe d'un milieu d'indice n_1 à un milieu d'indice n_2 supérieur à n_1 , il s'approche de la normale à la surface de séparation après le changement de milieu. »

c. Si on fait passer le faisceau du verre à l'air, il devrait s'éloigner de la normale à la surface de séparation après le changement de milieu.

8. On constate effectivement que le faisceau s'éloigne de la normale à la surface de séparation après le changement de milieu et qu'à partir d'une certaine valeur de l'angle d'incidence, il n'y a plus de rayon réfracté. On trouve i_{exp} de l'ordre de 42° .

9. a. Lorsque l'angle d'incidence vaut l'angle limite, l'angle réfracté vaut $90,0^\circ$.

b. Ici, le milieu 1 est le verre, le milieu 2 est l'air. D'après la loi de Snell-Descartes, l'angle limite vaut :

$$\begin{aligned} i_{11} &= \text{Arcsin} [(n_2/n_1) \cdot \sin(90,0^\circ)] \\ &= \text{Arcsin} [(1,00/1,50) \times \sin(90,0^\circ)] = 41,8^\circ. \end{aligned}$$

c. La valeur trouvée par le calcul correspond bien à celle trouvée expérimentalement.

10. a. Pour que le guidage soit possible, il faut que l'indice optique du cœur soit plus élevé que celui de la gaine.

b. Pour pouvoir être guidé jusqu'au bout de la fibre optique, l'angle d'incidence que fait le faisceau doit à chaque fois être supérieur à l'angle limite.

EXERCICES

COMPÉTENCE : Analyser des documents scientifiques

1. 1. Pour fabriquer du verre vitrocéramique, on joue sur les paramètres température et temps.

2. Après obtention du verre fondu, on le fait passer à l'état vitreux. On élève ensuite la température du verre de manière à faire apparaître des germes cristallins. Cette température est inférieure à celle pour laquelle le verre est fondu. Ensuite, on élève encore la température du verre (toujours en dessous de la température où il est fondu) de manière à faire croître les cristaux plus rapidement.

3. Le recuit consiste à élever la température du verre, sans pour autant le faire fondre.

4. Lors des paliers de germination et de croissance, le verre n'est pas fondu car, d'après le graphique, la température de ces deux étapes est inférieure à celle pour laquelle le verre est fondu.

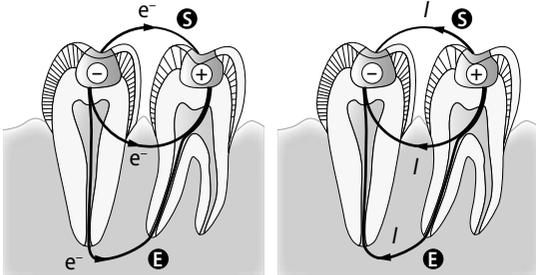
5. a. Un verre vitrocéramique présente une base amorphe d'un verre classique et des zones cristallines, provenant de la croissance des germes cristallins survenus lors des recuits.

b. Un tel verre a donc une structure semi-cristalline, avec une phase cristalline plus ou moins importante selon le taux de germination et la durée de croissance des cristaux.

2. 1. Biocompatible : compatible avec le milieu biologique, qui ne génère pas de réaction négative du milieu biologique.

2. Le système est ici équivalent à une pile : c'est donc sur la dent qui constitue le pôle positif de la pile qu'a lieu une réduction. C'est l'entité la plus oxydante qui se réduit. C'est donc la dent de droite qui est recouverte du métal le plus oxydant.

3. Sur le pôle positif de la pile a lieu une réduction, donc les électrons sont consommés par ce pôle. Au niveau du pôle négatif a lieu l'oxydation, les électrons sont donc libérés par cette électrode. Donc les électrons vont du pôle négatif vers le pôle positif de la pile. Le sens du courant étant inverse à celui des électrons, le courant est orienté du pôle positif vers le pôle négatif de la pile.



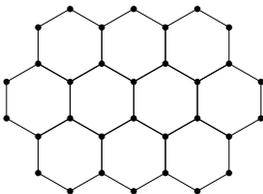
4. a. I est en ampère (A), U en volt (V) et les résistances en ohm (Ω).

b. On calcule :

$$I = U / (R_E + R_C + R_S) \approx 1 / (1 \times 10^8 + 1 \times 10^5) \approx 10 \text{ nA.}$$

5. Lorsqu'on mâche un morceau d'aluminium avec une dent qui a un amalgame métallique, on établit un contact entre l'aluminium et l'amalgame métallique, qui jouent chacun le rôle d'un pôle d'une pile. Le courant étant 1 000 fois plus intense que précédemment lors d'un contact direct, le courant créé est de l'ordre de 10 μA , ce qui génère une petite douleur.

3 1. Sur le schéma suivant, chaque sommet correspond à un atome de carbone.



2. Pour qu'un courant puisse être généré et mesuré par le passage d'un ion par un trou de la membrane de graphène, il faut que celui-ci soit conducteur électrique.

3. Chaque base du code génétique a une taille propre, différente de celle des autres bases. Le passage de chaque base par un trou de la membrane de graphène modifie donc d'une façon caractéristique le flux d'ions le traversant. Donc l'intensité du courant mesuré est propre à chaque base du code génétique.

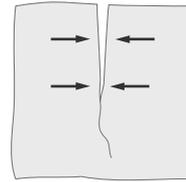
4 1. La dureté du verre est améliorée si la contrainte en surface σ est plus élevée. Il faut donc que ΔV soit positif.

2. ΔV positif signifie que le volume du verre après la trempe est supérieur à celui du verre avant la trempe :

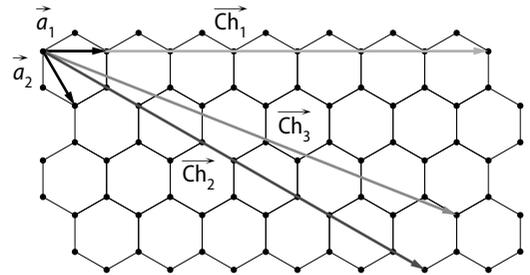
$$V_{\text{final}} > V_{\text{initial}}$$

3. Les ions potassium étant plus gros que les ions sodium, le volume du verre après la trempe est effectivement plus élevé qu'avant.

4. Les ions qui remplacent les ions sodium sont plus volumineux. La matrice vitreuse, en essayant de reprendre sa forme initiale, comprime ces ions. Ainsi, lors de la présence d'une fissure, la compression appliquée par la surface du verre pousse les deux côtés de la fissure l'un contre l'autre, ce qui évite sa propagation. La figure ci-dessous schématise la situation.



5 1. a. Les vecteurs \vec{Ch}_1 , \vec{Ch}_2 et \vec{Ch}_3 sont représentés ci-dessous.



b. Le vecteur d'enroulement \vec{Ch}_1 correspond au nanotube **b**, \vec{Ch}_2 au tube **a** et \vec{Ch}_3 au tube **c**.

c. Le nanotube **a** est en configuration armchair, le **b** est en configuration zig-zag.

d. Le nanotube de configuration zig-zag a un vecteur d'enroulement avec $m=0$. On peut dire que de manière générale, un nanotube sera en configuration zig-zag si $m=0$ ou si $n=0$. Le nanotube en configuration armchair a un vecteur d'enroulement avec $n=m$. On généralise en disant qu'un nanotube sera dans une configuration armchair si $n=m$.

2. Pour le nanotube correspondant à \vec{Ch}_1 , on a : $2n + m = 2 \times 7 + 0 = 14$, qui n'est pas multiple de 3. Ce nanotube est semi-conducteur.

Pour le nanotube correspondant à \vec{Ch}_2 , on a : $2n + m = 2 \times 4 + 4 = 12$, qui est multiple de 3. Ce nanotube est conducteur.

Pour le nanotube correspondant à \vec{Ch}_3 , on a : $2n + m = 2 \times 5 + 3 = 13$, qui n'est pas multiple de 3. Ce nanotube est semi-conducteur.

COMPÉTENCE : Pratiquer une démarche expérimentale

6 1. Cette observation montre que toutes les radiations se réfractent avec un angle différent.

2. A est sans unité et B en m².

3. On détermine l'indice optique d'un verre pour plusieurs radiations de longueur d'onde connue (voir **activité 5**). On a donc la valeur de *n* pour plusieurs valeurs de λ .

On trace ensuite le graphe de *n* en fonction de $1/\lambda^2$, on doit obtenir une droite de coefficient directeur égal à B et d'ordonnée à l'origine A.

4. Le bleu a une longueur d'onde plus faible que le rouge, donc son indice de réfraction dans le verre est plus élevé, et la réfraction qu'il subit, plus importante.

5. L'indice optique d'un milieu dépendant de la longueur d'onde de la radiation qui le traverse, on fait un choix arbitraire de longueur d'onde, pour donner une valeur d'indice optique.

7 1. La contrainte σ est une force par unité de surface, comme la pression. Elle s'exprime en Pa. La déformation ϵ est un rapport de longueur : c'est une grandeur sans dimension qui s'exprime sans unité.

2. On trouve $L = L_0 \cdot (1 + \epsilon)$.

3. a. Le volume de l'échantillon étant constant, on a $S_0 \cdot L_0 = S \cdot L$. Donc $S = S_0 \cdot L_0/L$.

b. On trouve ainsi $S = S_0/(1 + \epsilon)$.

4. Le diamètre initial mesure 2,0 mm, donc le rayon initial vaut 1,0 mm.

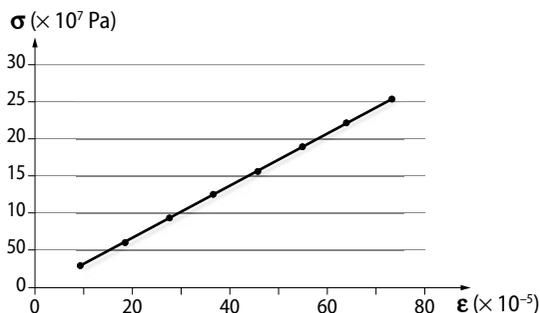
La section initiale de l'échantillon vaut :

$$S_0 = \pi \times \text{rayon}^2 = \pi \text{ mm}^2 = 3,14 \text{ mm}^2.$$

5. a. et b. On fait les calculs à l'aide des formules précédentes.

F (N)	$\epsilon (\times 10^{-5})$	L (m)	S (m ²)	σ (Pa)
100,00	9,095	0,040 004	$3,1413 \times 10^{-6}$	$3,1834 \times 10^{-7}$
200,00	18,192	0,040 007	$3,1410 \times 10^{-6}$	$6,3674 \times 10^{-7}$
300,00	27,291	0,040 011	$3,1407 \times 10^{-6}$	$9,5519 \times 10^{-7}$
400,00	36,393	0,040 015	$3,1404 \times 10^{-6}$	$1,2737 \times 10^{-8}$
500,00	45,494	0,040 018	$3,1402 \times 10^{-6}$	$1,5923 \times 10^{-8}$
600,00	54,597	0,040 022	$3,1399 \times 10^{-6}$	$1,9109 \times 10^{-8}$
700,00	63,703	0,040 025	$3,1396 \times 10^{-6}$	$2,2296 \times 10^{-8}$
800,00	72,810	0,040 029	$3,1393 \times 10^{-6}$	$2,5483 \times 10^{-8}$

Contrainte en fonction de la déformation



6. a. Le module de Young s'exprime dans la même unité que la contrainte, donc en Pa.

b. À l'aide d'une régression linéaire, on trouve un module de Young $E = 3,50 \times 10^{11}$ Pa, soit 350 GPa.

8 A. 1. a. Il faut verser le gélifiant progressivement et pas tout d'un coup pour éviter la formation de grumeaux.

b. Quand la préparation est homogène, il faut agiter lentement pour éviter d'y faire entrer des bulles d'air.

B. 2. a. Pour préparer le gel ①, il faut $2\% \times 50 = 1$ g de gélifiant et donc 49 g d'eau. Pour le gel ②, il faut :

$$5\% \times 100 = 5 \text{ g de gélifiant et } 95 \text{ g d'eau.}$$

b. Pour le gel ainsi préparé, la viscosité augmente avec la concentration en gélifiant.

C. 3. a. Acide tartrique à 5 % massique signifie qu'il y a 5 g d'acide tartrique pur pour 100 g de solution (donc 95 g d'eau).

b. En généralisant l'observation faite lors de l'ajout d'acide tartrique (qui diminue la viscosité du gel), on déduit qu'il faut préparer un gel de départ plus visqueux, c'est-à-dire ayant une concentration en gélifiant plus importante.

4. a. Pour préparer une solution de sulfate de cuivre à 0,75 % massique, il faut verser 0,75 g de sulfate de cuivre pour 100 g de solution.

b. L'ajout du sel de métal augmente la viscosité. Il faut donc que le gel de départ ait une viscosité plus faible que celle attendue à la fin. La concentration en gélifiant doit donc être plus faible que dans le gel de base.

COMPÉTENCE : Résoudre des problèmes scientifiques

9 1. Pour être tolérée par l'œil, la lentille doit être suffisamment perméable au dioxygène pour alimenter la surface de l'œil (et au dioxyde de carbone qui doit être évacué) et doit permettre un maintien du film aqueux recouvrant la surface oculaire.

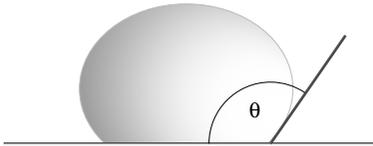
2. Dans les lentilles en hydrogel, c'est l'eau qui assure le passage du dioxygène vers l'œil.

3. Le mélange de polymères sert à donner de la consistance à la lentille, afin que celle-ci puisse être portée et avoir une bonne mobilité sur l'œil.

4. Le dessèchement de la lentille sur l'œil provoquerait une sensation désagréable et altérerait la surface de l'œil.

5. Les lentilles en silico-hydrogel ont une teneur en eau très faible qui peut être remplacée par les larmes de l'œil. La teneur en eau dans les lentilles en hydrogel étant trop élevée, les larmes ne peuvent pas remplacer toute l'eau qui leur manquerait.

10 1. On peut schématiser la goutte de la manière suivante.



2. Lorsque la mouillabilité d'un liquide diminue, l'angle de mouillage, lui, augmente.

3. L'effet antitache d'un revêtement est donc d'autant plus performant que l'angle de mouillage des liquides y est élevé.

4. a. Le revêtement nanostructuré diminue la surface de contact entre le tissu et la goutte, qui accrochera donc d'autant moins au tissu.

b. Un revêtement nanostructuré nécessite moins de produit qu'un revêtement uniforme ; il coûte moins

cher. De plus, un revêtement uniforme peut modifier considérablement l'aspect et le toucher de la surface du tissu, ce que ne fait pas, ou beaucoup moins, un revêtement nanostructuré.

11 A. 1. La contrainte étant une force par unité de surface, elle s'exprime dans la même unité que la pression, donc en Pa.

2. Pour une même contrainte, la distance sur laquelle se propage la fissure est plus importante pour le métal. C'est donc dans le métal que la fissure se propage plus facilement.

3. a. La céramique rompt pour une distance parcourue par la fissure plus faible. Le métal supporte donc une plus longue fissure avant rupture.

b. La céramique rompt pour une fissure plus courte : c'est le matériau le plus cassant des deux.

B. 1. Les deux courbes présentent une première partie linéaire identique. La céramique renforcée présente une deuxième partie non linéaire qui montre que la rupture de la pièce survient pour une fissure plus longue.

2. Une charge renforçante peut bloquer momentanément ou dévier une fissure.

3. Une fibre peut également bloquer ou dévier la fissure, elle peut également se briser ou se déchausser sous l'effet de la fissure.

4. Les contraintes mécaniques subies par la matrice lorsqu'elle est seule le sont également par les renforts lorsqu'elle est renforcée. Ces derniers permettent donc au matériau de supporter des contraintes plus élevées.

