

Nouveau programme

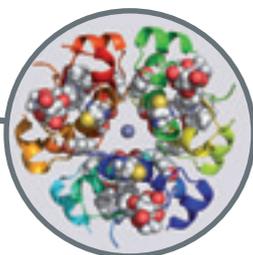
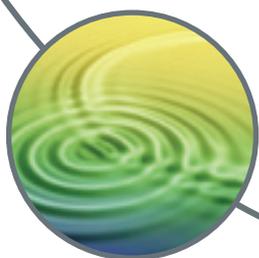
T
S

COLLECTION **DULAURANS** **DURUPHTY**

Physique Chimie

Enseignement spécifique

Livre du professeur



hachette
ÉDUCATION

Physique Chimie

T S

Enseignement spécifique

Livre du professeur

Sous la direction de

Thierry DULAURANS
Lycée Fernand-Daguin à Mérignac

André DURUPHTY
Lycée Paul-Cézanne à Aix-en-Provence

Michel BARDE
Lycée Marcel-Pagnol à Marseille

Nathalie BARDE
Lycée Saint-Charles à Marseille

Jean-Philippe BELLIER
Lycée Michel-Montaigne à Bordeaux

Vincent BESNARD
Lycée Montesquieu à Bordeaux

Marc BIGORRE
Lycée des Graves à Gradignan

Julien CALAFELL
Lycée Bellevue à Toulouse

Éric DAINI
Lycée Paul-Cézanne à Aix-en-Provence

Maryline DAINI-D'INCAN
Lycée Maurice-Janetti
à Saint-Maximin-la-Sainte-Baume

Marie des Neiges DE FLAUGERGUES
Lycée du Grésivaudan à Meylan

Magali GIACINO
Lycée Paul-Cézanne à Aix-en-Provence

Nicolas LESCURE
Lycée Michel-Montaigne à Bordeaux

Vanina MONNET
Lycée Michel-Montaigne à Bordeaux

Bruno POUDENS
Lycée des Graves à Gradignan

Isabelle TARRIDE
Lycée Val de Durance à Pertuis

Sommaire

Erratum.....	3
--------------	---

OBSERVER : Ondes et matière

1 Ondes et particules.....	5
2 Caractéristiques des ondes.....	10
3 Propriétés des ondes.....	18
4 Analyse spectrale.....	28
Pages Bac : exercices et TP.....	39

COMPRENDRE : Lois et modèles

5 Cinématique et dynamique newtoniennes.....	42
6 Application des lois de Newton et des lois de Kepler.....	56
7 Travail et énergie.....	70
8 Temps et relativité restreinte.....	82
9 Temps et évolution chimique : cinétique et catalyse.....	90
10 Représentation spatiale des molécules.....	100
11 Transformations en chimie organique : aspect macroscopique.....	109
12 Transformations en chimie organique : aspect microscopique.....	120
13 Réaction chimique par échange de proton.....	132
14 Transferts macroscopiques d'énergie.....	145
15 Transferts quantiques d'énergie et dualité onde-particule.....	154
Pages Bac : exercices et TP.....	162

AGIR : Défis du XXI^e siècle

16 Les enjeux énergétiques.....	168
17 Une chimie pour un développement durable.....	173
18 Contrôle de la qualité par dosage.....	182
19 Stratégie de synthèse et sélectivité en chimie organique.....	193
20 Numérisation de l'information.....	206
21 Transmission et stockage de l'information.....	214
22 Science et société.....	222
Pages Bac : exercices et TP.....	227

COMPLÉMENTS

Complément au chapitre 4 : Spectroscopie UV-visible, IR et de RMN	233
Complément au chapitre 8 : La relativité restreinte.....	240
Évaluation des incertitudes de mesure.....	253

Couverture : Pierre-Antoine Rambaud – **Suivi éditorial** : Annie Herschlikowitz
Maquette intérieure et composition : PCA/CMB Graphic
Schémas : Patrick Hanequand et Jean-Luc Maniouloux

Erratum

Lors de la réimpression de l'ouvrage, certaines erreurs ont été corrigées. Il est donc possible qu'il y ait différentes versions dans votre classe. Voici la liste des corrections qui nous semblent importantes.

Les éléments modifiés sont surlignés en jaune.

Chapitre 1

Page 24

Dans les consignes, il faut enregistrer la tension U_{CB} .

Chapitre 2

Page 57, exercice 33

Question 3 : « L'intensité sonore correspondant au seuil d'audibilité est de $1,0 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. »

Chapitre 3

Page 78, exercice 20

Erreur de numérotation dans la question 3 :

« **e**. L'incertitude sur la mesure...

Calculer l'incertitude...

d. En déduire un encadrement... »

Chapitre 4

Page 102, solution rédigée

Question 1 : « Domaine des nombres d'ondes pour $C_{\text{tri-H}} : 3200\text{-}3650 \text{ cm}^{-1}$. »

Page 112, exercice 41

Dans le **B**, question 4 : pour le composé D, il faut inverser les mentions entre parenthèses : les triplets sont pour **3H** et les quadruplets pour **2H**.

Chapitre 5

Page 132, A. Étude expérimentale

Dans l'énoncé, il s'agit du référentiel « héliocentrique » et non « géocentrique ».

Page 147, exercice 15

Il manque la lettre « **e**. » avant le dernier schéma (mouvement circulaire uniforme).

Page 148, exercice 16

Une aide au calcul indiquant que $\sqrt{2} \approx 1,4$ a été ajoutée.

Chapitre 6

Page 161

La question 5 doit être numérotée 4.

Page 169

Dans l'exercice 2, il faut inverser les questions 2 et 3 pour éviter une prise en compte de l'approximation d'une trajectoire circulaire dans la loi des aires. (Cela implique donc également une modification du corrigé, en page 606).

Page 174, exercice 16

Dans l'énoncé, il faut préciser que la route horizontale est rectiligne.

Page 174, exercice 17

Dans la formule de v_B (question 3.a), le d doit être

$$\text{sous la racine : } v_B = \sqrt{\frac{2e \cdot E}{m_e} \cdot d}$$

Page 177, exercice 23

Dans la question 5.a, il manque α en indice de la masse : m_α .

Chapitre 8

Pour déterminer $\Delta T'$, il faut disposer de deux horloges fixes dans le référentiel galiléen (R') et synchronisées entre elles, une horloge étant proche de l'un des événements, et l'autre horloge étant proche de l'autre événement.

Cela a nécessité plusieurs modifications dans le chapitre.

Page 220, exercice 14

Il faut préciser que $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Chapitre 9

Page 232

Dans la question 2, il faut préciser la masse volumique du benzaldéhyde : « Vérifier que le benzaldéhyde (de masse volumique $\rho = 1,042 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$) est le réactif limitant de cette synthèse. »

Page 251, exercice 27

Sur le graphe, en ordonnée, lire $[\text{H}^+(t)]$, qui est bien sûr identique à $[\text{H}_3\text{O}^+(t)]$.

Page 253, exercice 29

Dans le tableau, pour $t = 150 \text{ s}$, il faut lire $V(\text{O}_2) = 171 \text{ mL}$ et non 13 mL.

Chapitre 10

Page 275, exercice 29

Partie A, question 2 : restreindre la question aux molécules A, B, C et D.

Chapitre 11

Page 293, exercice 12

Dans la formule D, la liaison C=O doit être comme celle de B, au-dessus.

Page 295

Erreur de numérotation : l'exercice 24 a été numéroté 20 par erreur.

Page 298, exercice 33

Pour l'expérience 2, lire : « ...un volume $V' = 60$ mL d'une solution concentrée... ».

Chapitre 12

Page 320, exercice 25

Dans le mécanisme de la réaction de saponification, dans l'étape (2), par analogie avec l'étape (1) : dans le membre de gauche, lire « $R-C(O^-)(OH)-O-R'$ » ; dans le membre de droite, lire « $R'-O^-$ ».

De même, dans l'étape (3) : dans le membre de gauche, lire « $R'-O^-$ » ; dans le membre de droite, lire « $R'-O-H$ ».

Chapitre 13

Page 328

Dans la question 11.c, la valeur de K_A devrait être $1,58 \times 10^{-4}$.

Page 330, document 5

Remplacer la valeur 2,88 sur le 1^{er} écran par 3,40.

Page 333, document 10

Pour le sang, remplacer « 7,34-7,45 » par « 7,35-7,45 ».

Chapitre 16

Page 419

Les questions ont été numérotées de 1 à 13.

Chapitre 17

Page 454, exercice 13

Erreur de numérotation : remplacer « 4. » par « 3. », « 5. » par « 4. » et « 6. » par « 5. ».

Chapitre 18

Page 468

Document 6 : la concentration C_2 doit être $C_2 = 5,0 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Question 8 : il faut déplacer la phrase « En déduire la masse... » avant la phrase « Comparer la masse... ».

Chapitre 19

Page 493

Dans l'étape 1, il faut préciser une donnée : « ...et y introduire 7,0 mL d'anhydride acétique ($d = 1,08$). »

Page 503, exercice 2

Dans la question 2, il manque un atome d'oxygène dans la molécule B. (Cela implique donc également une modification du corrigé, en page 606).

Chapitre 20

Page 526, paragraphe « Les images numériques »

Remplacer « une série de nombres » par « un nombre ».

Page 532, exercice 21

Remplacer « 1 mm » par « 4 mm » (deux occurrences : Niveau 2 et Niveau 1, question 4).

Page 536, exercice 29

Dans l'énoncé, remplacer « 18,0 Mio » par « 7,3 Mio ».

Corrigés

Page 606, corrigés des QCM

Chapitre 4, exercice 4 : il faut ajouter la réponse C à la question 4.3 : 4.3. B et C.

Chapitre 5, exercice 3 : il faut remplacer « B » par « C » dans la réponse 3.2 : 3.2. C.

Chapitre 6, exercice 2 : il faut inverser les réponses 2.2 et 2.3 : 2.2. A ; 2.3. B.

Chapitre 17, exercice 1 : il faut remplacer « C » par « B » dans la réponse 1.7 : 1.7. A et B ; exercice 2 : il faut supprimer « et C » dans la réponse 2.2. : 2.2. A.

Page 608, corrigés du chapitre 4

Exercice 13, réponse 1.f : supprimer « CH_2- ».

Page 618, corrigés du chapitre 17

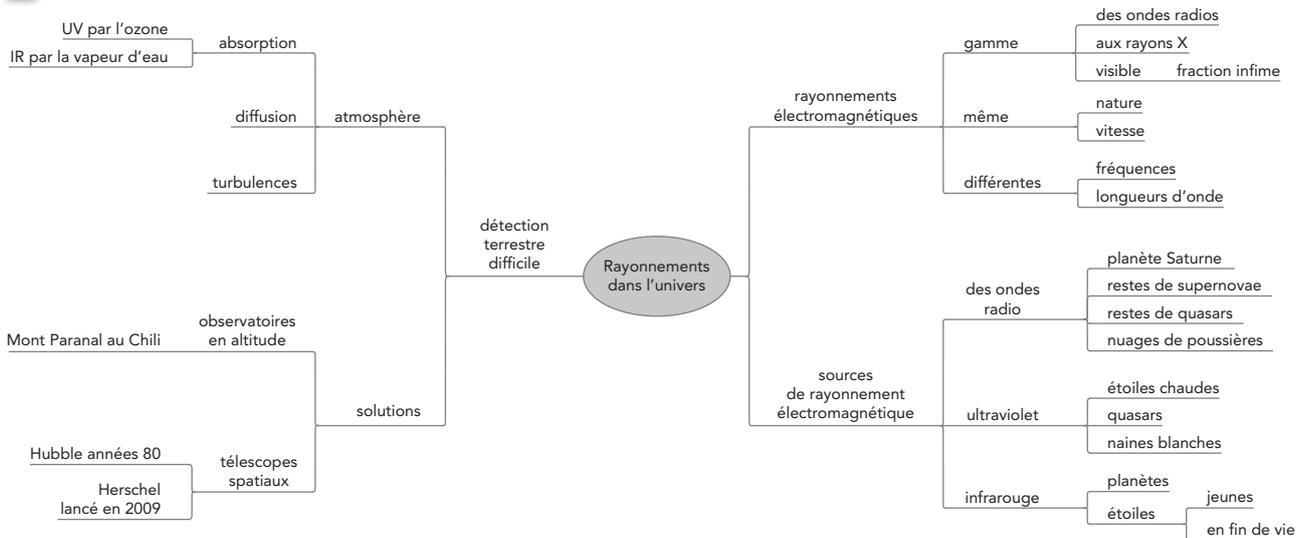
Exercice 3, remplacer « supérieur » par « inférieur ».

Ondes et particules

Activités

1 Ces rayonnements dans l'Univers (p. 20-21)

1 Exemple de carte mentale :



Il n'y a pas de carte type ni de carte universelle, chacun peut construire la sienne.

2 Le résumé peut être construit en lisant la carte. Par exemple :

« Les rayonnements électromagnétiques s'étendent des ondes radio aux rayons X, la lumière visible n'en est qu'une infime fraction. Ces rayonnements, qui sont de même nature et qui se propagent à la même vitesse, diffèrent par leur fréquence et leur longueur d'onde.

Ils sont émis par les corps célestes qui, selon leur température, émettent dans une gamme de fréquence déterminée.

Les rayonnements invisibles issus du cosmos ont été difficiles à détecter sur Terre à cause de l'atmosphère qui les absorbe ou les diffuse. Pour contourner ces difficultés, on a construit des observatoires en altitude et même disposé des télescopes au-delà de l'atmosphère. »

3 Les rayonnements difficilement observables depuis la surface de la Terre sont ceux absorbés par l'atmosphère. Il s'agit notamment des rayons X, des ultraviolets, des infrarouges lointains (rayons T), d'une partie des micro-ondes et des ondes radio.

4 a. La vapeur d'eau absorbe surtout les infrarouges. b. Le dioxygène et l'ozone absorbent surtout les ultraviolets.

5 Un radiotélescope capte les ondes radio, c'est-à-dire des ondes dont les longueurs d'onde sont supérieures à 10^{-1} m. Les ondes radio n'étant pas absorbées par l'atmosphère terrestre, on peut installer des radiotélescopes au niveau de la mer.

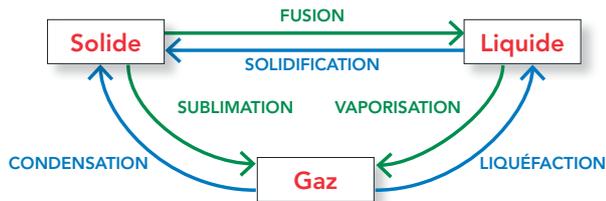
6 Un télescope spatial est un télescope placé au-delà de l'atmosphère. Le télescope spatial présente l'avantage, par rapport à son homologue terrestre, de ne pas être perturbé par l'atmosphère terrestre.

2 Des particules qui proviennent de l'Univers (p. 22-23)

1 Les muons observés à la surface de la Terre proviennent des collisions entre les particules cosmiques et les particules de la haute atmosphère.

2 La vapeur dans l'aquarium est formée de propan-2-ol.

3 a. Un corps pur peut exister sous trois états physiques : solide (compact et ordonné), liquide (compact et désordonné) et gazeux (dispersé et très désordonné).



b. Le propan-2-ol devrait se trouver à l'état liquide, car la température de la carboglace est autour de -80 °C alors que la température de fusion du propan-2-ol est de -88 °C et que sa température d'ébullition est de 83 °C .

4 a. Les traces blanches observées sont des gouttelettes de propan-2-ol liquide dans le gaz instable.

La vapeur d'alcool est dans un état instable en dessous de sa température d'ébullition, prête à se condenser sous l'action d'ions formés lorsqu'une particule chargée traverse la couche. Ainsi les traces que nous voyons sont des gouttelettes d'alcool formées le long des chemins des particules ionisées qui passent à travers la chambre à brouillard.

b. Les muons sont détectés par la formation de gouttelettes de « brouillard » de propan-2-ol.

5 Ce dispositif permet de visualiser le passage des muons et d'en faire un comptage.

Complément

Liens utiles :

<http://teachers.web.cern.ch/teachers/archiv/HST2003/publish/cloud%20chamber/Cloud%20chambers%20in%20the%20classroom.doc>

<http://www.masc.ulg.ac.be/fiches/FR/construirechbrouillard.pdf>

Vidéo MIT :

<http://techtv.mit.edu/videos/3141-cloud-chamber>

Pour se procurer de la carboglace :

<http://www.cryo-ice.fr/>

3 Des ondes sismiques (p. 24-25)

A Détection des ondes sismiques

1 a. Les ondes sismiques sont des ondes mécaniques progressives. Elles se propagent dans le globe terrestre et provoquent des vibrations temporaires. On distingue différents types d'ondes, notamment des ondes P et des ondes S.

b. L'épicentre d'un séisme est le lieu de la surface de la Terre situé à la verticale du foyer.

2 Le sismographe du document 5 capte les vibrations ; il délivre un signal mécanique dont l'amplitude est tracée sur le papier. Le sismographe du document 6 capte également les vibrations qu'il transforme en signal électrique.

3 a. Pour établir la relation entre la tension mesurée U_{CB} , la distance d et le champ électrostatique E , on mesure U_{CB} pour diverses valeurs de d .

b. Les mesures montrent que U_{CB} est proportionnelle à d , donc la relation est de la forme $U_{CB} = k \cdot d$.

De plus, quand $d = L$, alors $U_{CB} = U_{AB} = E$, donc $U_{AB} = k \cdot L$. On en déduit $k = \frac{U_{AB}}{L} = E$.

Finalement $U_{CB} = E \cdot d$.

4 Le montage réalisé est un capteur de mouvement, car il convertit le mouvement d'un mobile au cours du temps en tension au cours du temps.

B Exploitation d'enregistrements d'ondes sismiques

Complément

Dans cette partie de l'activité, on ne s'intéresse qu'aux ondes P pour exposer, de façon simplifiée, la méthode de détermination de la position de l'épicentre.

Pour cela, on utilise la date T_0 à laquelle s'est produit le séisme et une valeur moyenne de la vitesse V_p .

Lors d'un séisme, la démarche suivie par les spécialistes est plus complexe. En effet, la date T_0 n'est pas connue par chacune des stations qui détecte les ondes. De plus, la vitesse des ondes dépend de la nature du sol, de la profondeur à laquelle ces ondes se déplacent et de la distance séparant la station de l'épicentre. Les ondes P ne sont pas utilisées seules, la détermination de la distance séparant la station de l'épicentre utilise l'arrivée de nombreuses ondes, dont les ondes P et les ondes S. Cette détermination nécessite également de prendre en compte les particularités locales liées à la nature du sol.

Exemple : http://www.edusismo.org/docs/Acti_peda/071118_224109-1/epicentre.pdf

5 Sur la courbe, on observe de légères vibrations avant l'arrivée des ondes P (bruit de fond), puis des vibrations de grande amplitude correspondant à l'arrivée des ondes, d'abord les ondes P les plus rapides, puis les autres ondes (dont les ondes S).

6 a. La durée $\Delta t = T_P - T_0$ représente approximativement la durée de propagation des ondes P entre l'épicentre et la station qui capte ces ondes P.

b. Le pointage n'est pas très précis on peut évaluer la précision à 1 s.

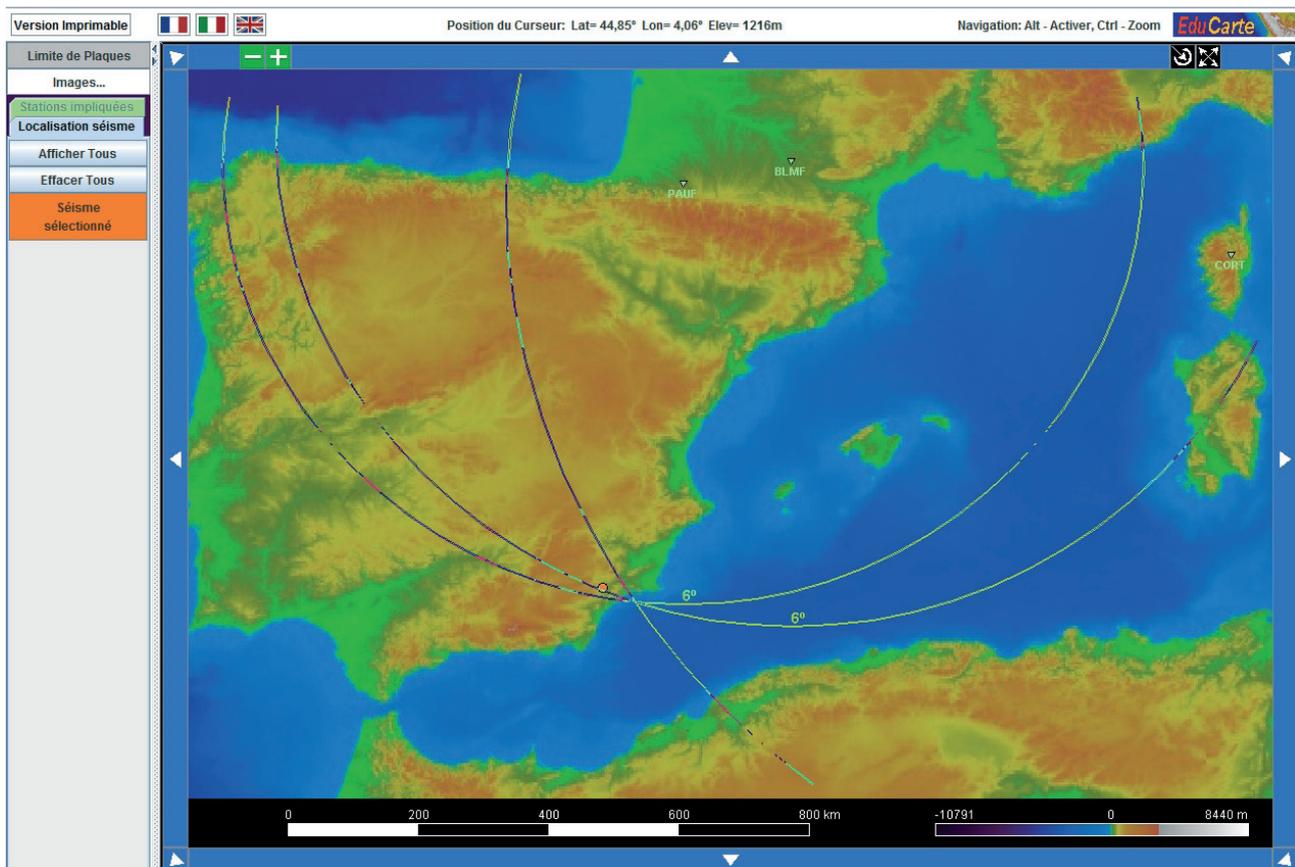
7 $T_P - T_0 = \frac{D}{V_P}$ d'où $D = (T_P - T_0) \times V_P$

On trace pour chacune des stations, un cercle de centre, la station et de rayon, D .

L'épicentre est à l'intersection des trois cercles. La position réelle de l'épicentre est à quelques dizaines de kilomètres de l'intersection des trois cercles.

Exemple de résultats

Station	$\Delta t = T_P - T_0$	Distance D
PAUF	85,5 s	686 km
BLMF	96 s	768 km
CORT	137 s	1027 km



8 a. La distance entre la position réelle et la position déterminée géométriquement est de 63 km.

La détermination de la position de l'épicentre n'est pas très précise.

Plusieurs sources d'erreurs peuvent être envisagées :

- la détermination de T_0 (fourni par le site Internet);
- la détermination de T_P lors du pointage;
- la vitesse des ondes P qui n'est pas constante.

b. L'erreur relative est obtenue en comparant la distance mesurée entre la station et l'épicentre avec la distance calculée précédemment, ici 63 km.

Station	Erreur relative
PAUF	$\frac{63}{686} \times 100 = 9,2 \%$
BLMF	$\frac{63}{768} \times 100 = 8,2 \%$
CORT	$\frac{63}{1027} \times 100 = 6,1 \%$

Exercices (p. 29-35)

1 La mer sous haute surveillance

1. La houle cyclonique se situe dans la périphérie du cyclone. Elle correspond à la formation de vagues de grande hauteur qui transportent beaucoup d'énergie. Cette houle peut inonder les côtes et provoquer des dégâts.

2. Les bouées comme Antilles 1 et 2 mesurent diverses grandeurs qui permettent d'analyser les conditions météorologiques et de faire des prévisions.

3.

Grandeur	Unité	Unité SI	Capteur
Pression de l'air	Pa	Pa	Pressiomètre (baromètre)
Température	°C	K	Thermomètre
Vitesse du vent	m·s ⁻¹	m·s ⁻¹	Anémomètre
Hauteur de la houle	m	m	
Direction de la houle	°	°	Boussole
Salinité	g·L ⁻¹	kg·m ⁻³	
Vitesse du courant	m·s ⁻¹	m·s ⁻¹	

4. Le graphique donne, pour la date du 24 janvier 2011, la hauteur et la direction de la houle dans l'Atlantique Nord.

Au point de coordonnées (20° W; 40° N), la hauteur de la houle était d'environ 3,5 m avec une direction est-sud-est.

2 Les séismes

1. L'échelle de Richter n'est pas limitée, ni d'un côté ni de l'autre, d'où l'expression d'échelle ouverte.

2. Le texte du document 1 indique qu'une augmentation d'une unité de magnitude correspond à la multiplication par 30 de l'énergie.

Sur le graphique du document 4, on observe qu'entre le séisme de Haïti (énergie proche de 8×10^{15} J) et le séisme de Sumatra (énergie proche de 7×10^{18} J) il y a un facteur proche de $900 \left(\frac{7 \times 10^{18}}{8 \times 10^{15}} = 875 \right)$.

Or, entre ces deux séismes la magnitude augmente de deux unités, l'énergie est donc multipliée par $30^2 = 900$. On retrouve l'ordre de grandeur du facteur obtenu à partir du graphique.

Une augmentation d'une unité de magnitude correspond donc bien à la multiplication par 30 de l'énergie libérée au niveau du foyer.

3. Le document 3 indique à tort qu'une augmentation d'une unité de la magnitude correspond à une multiplication par 10 de l'énergie. En fait, il s'agit d'une multiplication par 30.

4. L'échelle logarithmique est graduée en puissance de 10. Le passage d'une graduation à la suivante correspond à une multiplication par 10.

Sur le document 4, l'échelle choisie montre une multiplication par 10^2 .

5. Ce séisme a entraîné un tsunami ravageant une partie des côtes japonaises.

6. L'intensité d'un séisme mesure les effets et les dégâts de ce séisme. Elle dépend de l'énergie libérée, de la topologie des lieux et de l'éloignement par rapport à l'épicentre du séisme.

3 Ondes de choc et vitres brisées

1. a. Le son dans l'air est une propagation de compression et de dépression des molécules constituant l'air.

b. Contrairement à la schématisation, dans l'air, le son ne se propage pas dans une seule direction. De plus, les échelles ne sont pas respectées.

2. Le son se propage plus rapidement dans les milieux condensés (solides et liquides) que dans les gaz, car les vibrations se propagent mieux dans les milieux où il existe des liaisons entre les entités microscopiques.

3. Une onde de choc correspond à une « vague » de très haute pression.

Une onde de choc peut être produite lorsqu'un avion est en vol supersonique ou lors d'une détonation où le front d'onde dépasse la vitesse du son.

4. Une onde de choc peut briser une vitre. Si les molécules qui constituent la vitre vibrent avec une amplitude très grande, la vitre peut se briser.

4 Les balises Criirad surveillent

1. a. Une particule alpha est un noyau d'hélium. Une particule bêta moins est un électron; une particule bêta plus est un positron.

Le rayonnement gamma correspond à l'émission de photons.

b. La grandeur mesurée en becquerel (Bq) est l'activité radioactive.

$1 \text{ Bq} = 1 \text{ désintégration par seconde}$.

2. Une balise atmosphérique détecte la radioactivité alpha ou bêta.

Une balise aquatique détecte la radioactivité gamma.

3. Les balises sont placées particulièrement dans la vallée du Rhône, car cette région comporte de nombreuses installations de l'industrie nucléaire.

4. La balise aquatique est située en aval des installations de la vallée du Rhône, elle pourra donc détecter la radioactivité provenant de l'une ou l'autre des installations positionnées le long du fleuve.

5. Le seuil de détection des balises atmosphériques est de $1,0 \text{ Bq par m}^3 \text{ d'air}$.

Durant la période considérée, les mesures de la balise étaient inférieures au seuil de détection.

6. a. L'activité de l'iode 131 est mesurée, car cet isotope est très présent dans les installations nucléaires.

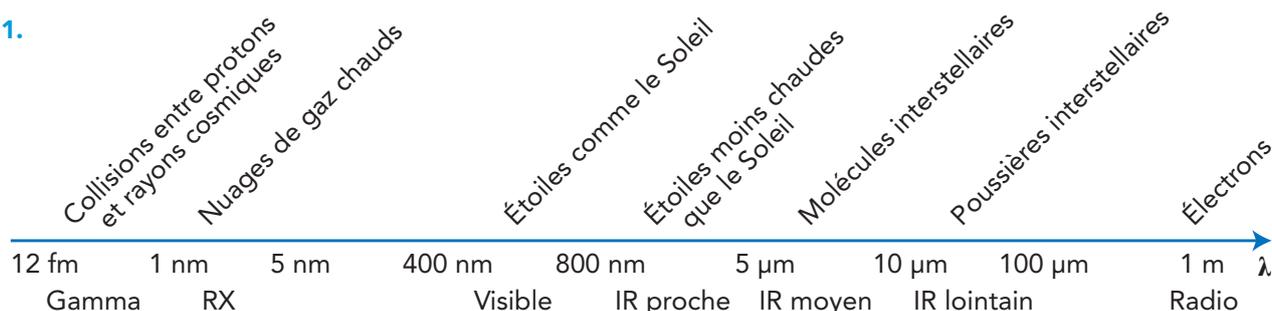
b. Le terme « particulaire » fait référence à des composés solides en suspension dans l'air.

7. La forte activité mesurée entre la fin mars 2011 et le début avril peut être due à l'accident de Fukushima. Le décalage de temps est lié au déplacement des gaz sur une très grande distance (distance de l'ordre de 15 000 km).

Retour sur l'ouverture du chapitre

5 Observations de la Voie lactée dans différents domaines

1.



2. a. $\lambda = \frac{c}{\nu}$ avec λ en m, c en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ et ν en Hz.

b. Le rayonnement de plus grande fréquence est celui de plus petite longueur d'onde. Parmi les rayonnements cités, celui de plus grande fréquence est le rayonnement gamma.

3. a. $\mathcal{E} = h \cdot \nu$ avec \mathcal{E} en J, h en $\text{J} \cdot \text{s}$ et ν en Hz.

b. Le rayonnement de plus grande énergie est celui dont la fréquence est maximale, c'est donc celui dont

la longueur d'onde est minimale. Parmi les rayonnements cités, le plus énergétique est le rayonnement gamma.

4. Les divers « objets » de l'Univers n'émettent pas dans les mêmes domaines de longueur d'onde. Les diverses observations sont donc complémentaires. Par exemple, l'observation dans les RX permet de détecter les nuages de gaz chauds.

Comprendre un énoncé

6 La radiographie

1. a. Les électrons produits par la cathode sont à l'origine de la production des RX lors de leur interaction avec la matière présente à l'anode.

b.

Particule	Charge	Masse
Proton	$+e = +1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$	De l'ordre de 10^{-27} kg
Neutron	Charge nulle	De l'ordre de 10^{-27} kg
Électron	$-e = -1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$	De l'ordre de 10^{-30} kg

2. a. Les zones absorbant beaucoup les rayons X, comme les os, paraissent blanches, celles absorbant peu les rayons X, comme la chair, paraissent plus sombres.

b. Les numéros atomiques des éléments chimiques constituant les os sont plus grands que ceux constituant la chair.

c. L'épaisseur traversée par les RX est plus importante quand l'os est plus gros.

3. Le radiologue peut jouer sur deux paramètres : la tension accélératrice des électrons et la durée d'exposition du patient.

4. Les étoiles froides qui émettent dans l'infrarouge et les nuages de poussière qui émettent dans le domaine des ondes radio.

Activités

1 Ondes progressives à une dimension (p. 38)

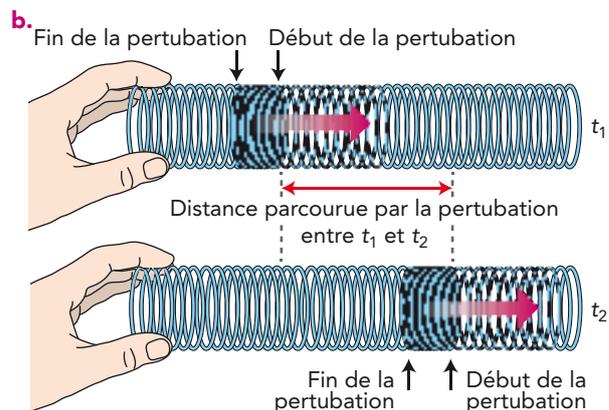
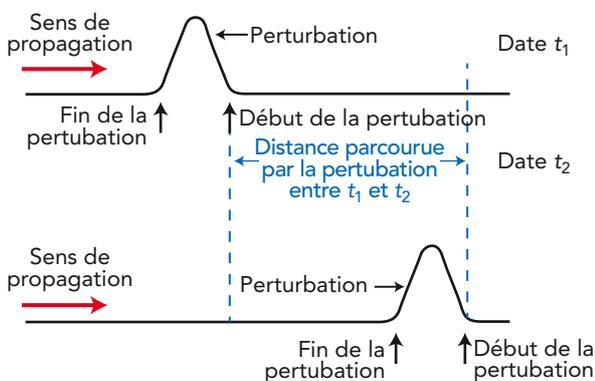
A Analyse qualitative d'une onde

1 L'onde est progressive puisque la perturbation se déplace le long de la corde ou du ressort. L'onde est à une dimension puisqu'elle se propage dans une seule direction (celle de la corde ou du ressort).

2 Pour la corde, la direction de la perturbation est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde (le long de la corde) : l'onde est donc transversale.

Pour le ressort, la direction de la perturbation (compression-détente) est la même que celle de propagation de l'onde (le long du ressort) : l'onde est donc longitudinale.

3 a.



B Analyse quantitative : mesure de la célérité de l'onde

4 Soit d la distance parcourue par la perturbation entre t_1 et t_2 . Soit $\Delta t = t_2 - t_1$ la durée de parcours de la perturbation.

$\Delta t = \text{nb d'images entre } t_1 \text{ et } t_2 \times$

$\frac{1}{\text{nb d'images par sec de la vidéo}}$

La célérité de l'onde (supposée constante) se calcule

$$\text{par } v = \frac{d}{\Delta t}.$$

5 La célérité v d'une onde se calcule par $v = \frac{d}{\Delta t}$.

v s'exprime en mètre par seconde ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), la distance d parcourue par l'onde s'exprime en mètre (m) et la durée Δt en seconde (s).

Complément

Voir la simulation à l'adresse suivante : http://phet.colorado.edu/sims/wave-on-a-string/wave-on-a-string_fr.html

2 Caractéristiques d'une onde progressive périodique (p. 39)

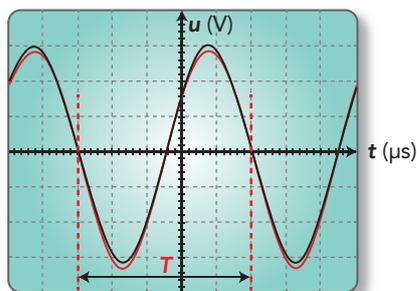
A Mesure de la période d'une onde ultrasonore

1 Les deux signaux ont la même période et des valeurs maximales (amplitudes) différentes. Ils sont en général décalés le long de l'axe des abscisses ; on

dit qu'ils sont déphasés. Quand on éloigne le récepteur de l'émetteur (en restant dans l'axe), l'amplitude du signal diminue.

2 L'onde ultrasonore est progressive puisqu'elle se propage depuis l'émetteur vers le récepteur. L'onde ultrasonore est périodique : elle se reproduit à l'identique à intervalles de temps égaux.

3 a.



On repère 5,0 divisions pour T sachant qu'une division correspond à $5,0 \mu\text{s}$.

$$T = 5,0 \times 5,0 = 25 \mu\text{s}$$

b. Incertitude de lecture : une demi-graduation ($0,1$ division) (voir le livre de Seconde), soit $U(T) = 0,5 \mu\text{s}$. Incertitude sur l'oscilloscope (base de temps) : voir la notice du constructeur.

4 La fréquence est l'inverse de la période :

$$f = \frac{1}{T} = 4,0 \times 10^4 \text{ Hz}$$

$$U(f) = f \times \frac{U(T)}{T} = 8,0 \times 10^2 \text{ Hz}$$

d'où : $39\,200 \text{ Hz} \leq f \leq 40\,800 \text{ Hz}$.

Cet encadrement est compatible avec la valeur indiquée par le constructeur si la valeur lue sur le GBF est contenue dans cet encadrement.

3 Acoustique musicale (p. 40-41)

A Modélisation d'une onde sinusoïdale

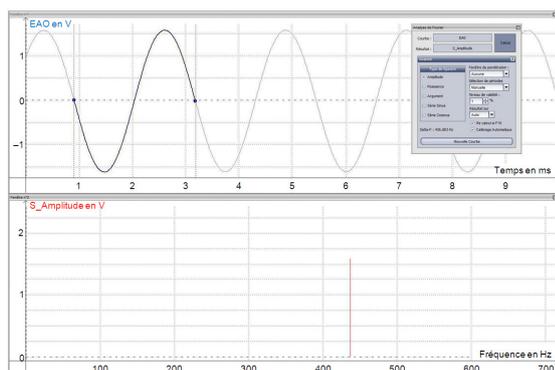
1 a. Le signal a l'allure d'une sinusoïde (voir la capture d'écran ci-dessous).

b. On lit graphiquement (à l'aide du réticule) une amplitude $U_{\text{max}} = 1,62 \text{ V}$ et une période $T = 2,28 \text{ s}$.

On en déduit la fréquence $f = \frac{1}{T} = 439 \text{ Hz}$ pour le son émis par le diapason.

c. Le spectre en fréquences (voir la capture d'écran ci-dessous) présente un pic pour la fréquence de 440 Hz .

On retrouve sur le spectre la fréquence du son émis par le diapason (abscisse du pic) et son amplitude (ordonnée du sommet du pic).



B Mesure de la longueur d'onde d'une onde ultrasonore

5 a. On repère les première et deuxième positions du récepteur mobile pour lesquelles les deux signaux sont en phase. La distance entre ces deux positions correspond à la longueur d'onde : $\lambda = 0,80 \text{ cm}$.

b. On constate que, sur une plage de quelques millimètres environ pour la position du récepteur, on peut observer des ondes en phase. En tenant compte de l'incertitude de lecture à la règle, on peut estimer l'incertitude $U(\lambda)$ de l'ordre de 3 mm .

c. $0,50 \text{ cm} \leq \lambda \leq 1,1 \text{ cm}$

d. Avec le protocole précédent, l'incertitude est grande par rapport à la longueur d'onde. On peut minimiser l'incertitude de lecture en mesurant 10 longueurs d'onde au lieu d'une. On trouve $\lambda = 0,85 \text{ cm}$, avec une incertitude de $0,03 \text{ cm}$.

6 a. En une période, l'onde parcourt la distance :
 $d = v \cdot T = 340 \times 25 \times 10^{-6} = 8,5 \text{ mm}$.

On retrouve la longueur d'onde de l'onde ultrasonore.

b. On en déduit la relation

$$v = \frac{\lambda}{T} \text{ avec } v \text{ en mètre par seconde, } \lambda \text{ en mètre et } T \text{ en seconde.}$$

Manuel numérique

Animation : Ondes sonores (mesure de λ).

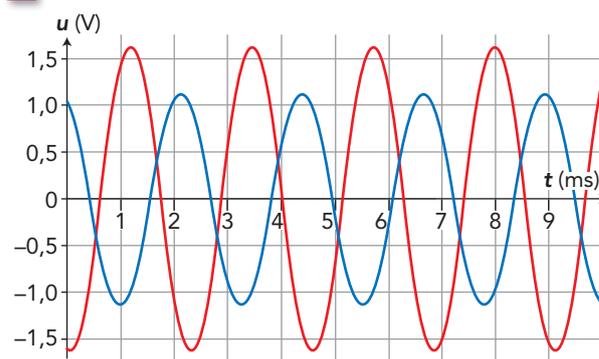
2 a. La modélisation donne :

$$A = 1,62 \text{ V}; \quad B = 2758 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}; \quad C = -3,28 \text{ rad.}$$

b. A s'identifie à l'amplitude U_{max} .

$$\frac{2\pi}{T} = 2755 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}; \text{ on retrouve } B.$$

3



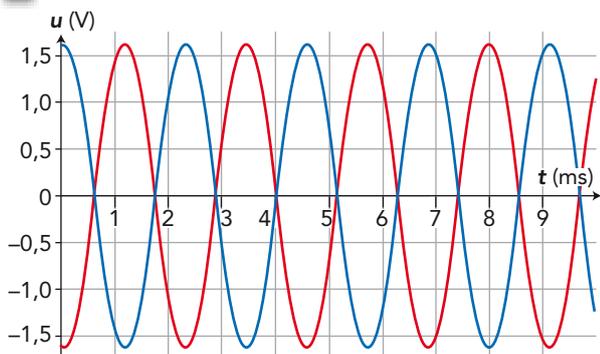
Les deux signaux ont même allure (sinusoïdale), même période et donc même fréquence. Leurs amplitudes sont différentes et ils sont décalés dans le temps.

La modélisation du second signal donne les résultats suivants :

$$A' = 1,12 \text{ V}; \quad B' = 2763 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}; \quad C' = 0,426 \text{ rad.}$$

$A \neq A'$ mais $B \approx B'$ (ce qui était prévisible, voir la question 2b).

4



Le paramètre C a une influence sur la valeur de départ (à l'origine) de la représentation graphique. De plus, si $C \neq C_1$, les courbes sont décalées dans le temps, même si les périodes et les amplitudes sont identiques.

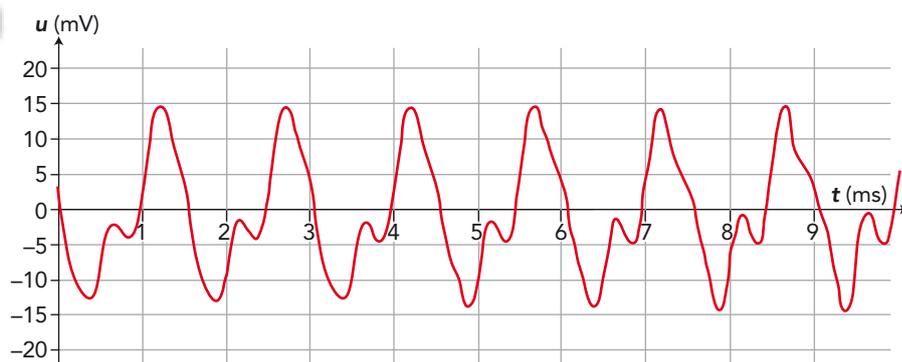
5 Une onde sinusoïdale peut être modélisée par l'expression :

$$x(t) = X_{\max} \cdot \cos\left(\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right) + \Phi\right)$$

avec $x(t)$ l'élongation de l'onde à l'instant t , X_{\max} son amplitude, T sa période et Φ sa phase à l'origine.

B Hauteur d'un son et fréquence

6



Mi₄ piano

$T = 1,543$ ms
et $f = 648$ Hz



La₃ piano

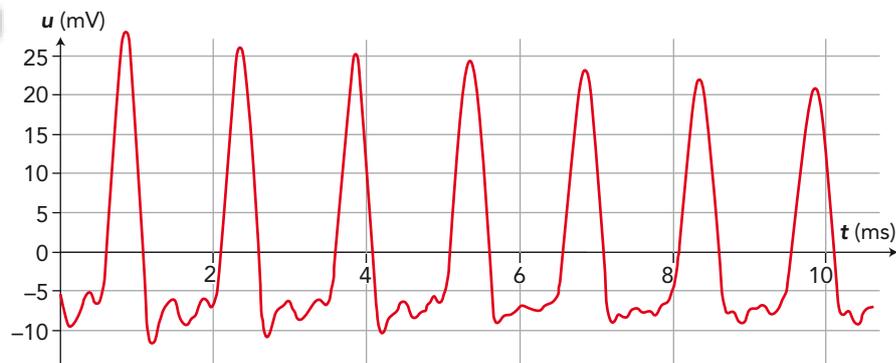
$T = 2,256$ ms
et $f = 444$ Hz

7 Le son le plus aigu est le Mi₄.

8 La hauteur d'un son est liée à sa fréquence : plus le son est aigu plus sa fréquence est élevée.

C Timbre d'un son et harmoniques

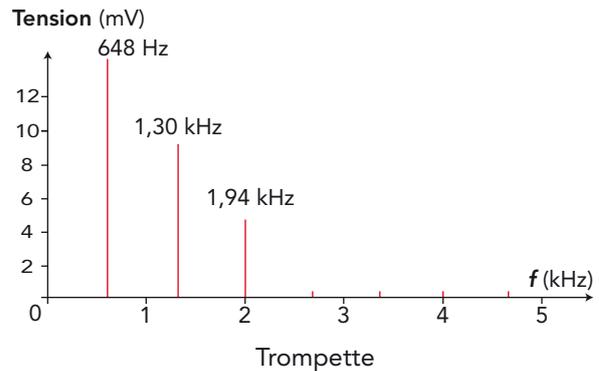
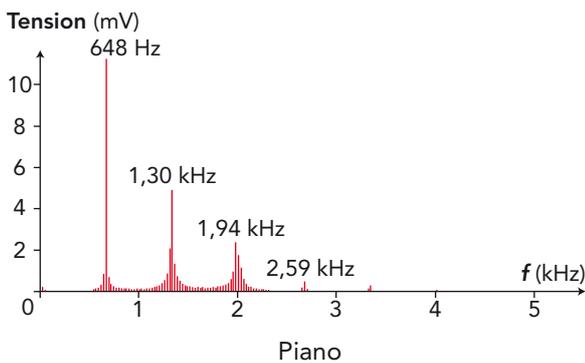
9



Mi₄ trompette

Pour les deux notes, on trouve $T = 1,543$ ms et $f = 648$ Hz.

10 a. La fréquence du fondamental est la même pour les deux notes et vaut 648 Hz.



b. Les autres fréquences sont des multiples de 648 Hz.

11 Le timbre est différent pour les deux notes, car les intensités des harmoniques ne sont pas les mêmes.

12 La hauteur d'un son est liée à la fréquence de son fondamental. Le timbre d'un son est lié au nombre d'harmoniques et à leurs intensités respectives.

13 La synthèse électronique consiste à créer un son en partant du postulat qu'il est la somme des sinusoïdes de fréquence f et $n \cdot f$ avec n entier.

Manuel numérique 2.0

Simulation : Acoustique musicale (timbre, hauteur, intensité sonore, analyse spectrale).

Exercices (p. 47-59)

QCM

- 1** 1. A et B; 2. A; **2** 1. C; 2. A et B; 3. A; 4. C;
3 1. B; 2. A; 3. A; 4. C.

Application immédiate

4 Déterminer une longueur d'onde

$10 \lambda = 2,12 \text{ m}$, d'où $\lambda = 0,212 \text{ m}$.

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{340}{0,212} = 1,60 \times 10^3 \text{ Hz}$$

5 Analyser un son

$$1,21 \times 10^{-3} \text{ s} < T < 1,27 \times 10^{-3} \text{ s},$$

$$\text{donc } 7,87 \times 10^2 \text{ Hz} < f < 8,26 \times 10^2 \text{ Hz}$$

$$\text{et } 2,36 \times 10^3 \text{ Hz} < 3f < 2,48 \times 10^3 \text{ Hz},$$

donc la fréquence du 3^e harmonique ne peut pas être $2,31 \times 10^3 \text{ Hz}$.

Pour commencer

6 Connaître les ondes progressives

1. Une onde progressive est la propagation d'une perturbation dans un milieu.

2. Une onde transporte de l'énergie.

3. Cette durée est appelée le retard.

7 Déterminer une vitesse de propagation

1. La perturbation atteint le point A à la date $t_A = 0,20 \text{ s}$.

2. Le point A est en mouvement pendant $\Delta t = 0,05 \text{ s}$.

$$3. v = \frac{d}{t_A} = \frac{1,50}{0,20} = 7,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

8 Reconnaître l'allure d'une onde

L'allure de la corde à la date $t = 0,20 \text{ s}$ est la **c**, car la perturbation a atteint A situé à 1,5 m; l'allure de la perturbation est « inversée » par rapport à la représentation temporelle.

9 Calculer des durées de propagation

$$1. \Delta t_A = \frac{d}{v_{\text{acier}}} = \frac{1000}{5000} = 0,2000 \text{ s}$$

$$2. \Delta t_J = \frac{d}{v_{\text{air}}} = \frac{1000}{340} = 2,94 \text{ s}$$

$$3. \Delta t = \Delta t_J - \Delta t_A$$

$$\Delta t = 2,94 - 0,20 = 2,74 \text{ s}$$

10 Exploiter un oscillogramme

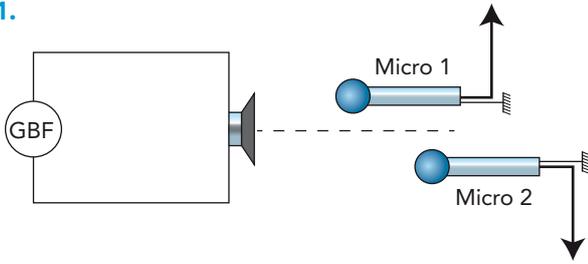
$$1. T = 2,0 \text{ div} \times 10 \mu\text{s/div} = 20 \mu\text{s}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{20 \times 10^{-6}} = 50 \times 10^3 \text{ Hz}$$

$$2. \lambda = \frac{v}{f} = \frac{333}{50 \times 10^3} = 0,0067 \text{ m} = 6,7 \text{ mm}$$

11 Exploiter une expérience

1.



2. Les signaux sont en phase et n'ont pas la même amplitude. Ils ont la même période et donc la même fréquence.

3. Les microphones ne sont pas à la même distance du haut-parleur, car les signaux ont des amplitudes différentes.

12 Connaître la double périodicité

1. a. $\lambda = v \cdot T$

b. λ s'exprime en mètre, v en mètre par seconde et T en seconde.

2. On obtient le tableau suivant :

v	T	λ
$335 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$3,6 \times 10^{-5} \text{ s}$	1,2 cm
$225 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	1,14 ms	25,7 cm
$1,48 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$	25 μs	3,7 cm

13 Reconnaître une représentation graphique

1. a. $T = 4 \text{ ms}$; b. $U_{\text{max}} = 200 \text{ mV}$; c. $\Phi = 0 \text{ rad}$.

2. La représentation a correspond à l'équation.

14 Reconnaître une équation

1. a. $T = 2,0 \text{ ms}$; b. $U_{\text{max}} = 200 \text{ mV}$.

2. L'équation 3 correspond à la représentation graphique; d'après le graphique, il faut avoir $u(0) = 0$.

15 Différencier hauteur et timbre

1. La hauteur d'un son est liée à la fréquence de son fondamental.

2. Le timbre d'un son est lié au nombre d'harmoniques et à leurs amplitudes.

16 Exploiter des spectres sonores

1. La fréquence du fondamental, $f_1 = 440 \text{ Hz}$, étant la même pour les deux notes, elles ont la même hauteur.

2. Le timbre est caractérisé par les harmoniques. Les harmoniques sont différents, donc les timbres seront différents.

17 Calculer un niveau d'intensité sonore

1. $I = I_0 \cdot 10^{\frac{L}{10}} = 10^{-12} \times 10^{\frac{100}{10}}$

$$I = 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

2. $I_{\text{total}} = 2 \times I = 2 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

$$L = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

$$L = 10 \cdot \log\left(\frac{2,0 \times 10^{-2}}{1,0 \times 10^{-12}}\right) = 103 \text{ dB}$$

Pour s'entraîner

18 Qui perçoit le son en premier ?

1. Le son se propage plus vite dans l'eau que dans l'air; il est perçu en premier par la nageuse N.

2. Soit Δt_{air} la durée au bout de laquelle S perçoit le son. Le son a parcouru la distance d à la vitesse

$$v_{\text{air}} \text{ en } \Delta t_{\text{air}} = \frac{d}{v_{\text{air}}}.$$

De même Δt_{eau} est la durée au bout de laquelle N perçoit le son. Le son a parcouru la distance d à la

$$\text{vitesse } v_{\text{eau}} \text{ en } \Delta t_{\text{eau}} = \frac{d}{v_{\text{eau}}}.$$

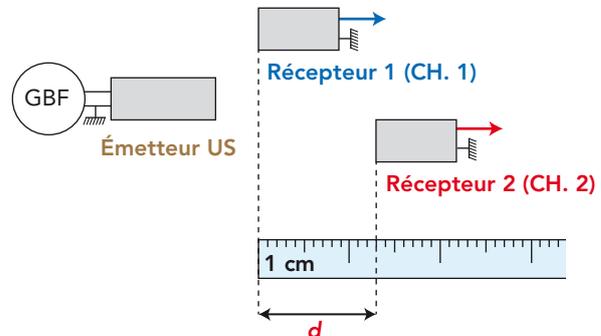
La durée Δt séparant les deux détections est :

$$\Delta t = \Delta t_{\text{air}} - \Delta t_{\text{eau}} = \frac{d}{v_{\text{air}}} - \frac{d}{v_{\text{eau}}}$$

3. On trouve une durée de 22,7 ms.

19 Incertitudes sur la mesure

1.



Deux récepteurs à ultrasons sont placés devant un émetteur. On repère une position pour laquelle les signaux sont en phase, puis l'on déplace progressivement l'un des deux récepteurs par rapport à l'autre de manière à mesurer 10 longueurs d'onde.

La mesure de la longueur d'onde et de la fréquence permet de calculer la célérité des ultrasons.

2. Valeur moyenne de la célérité : $339,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Écart type : $\sigma_{n-1} = 2,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$U(v) = k \times \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$ avec $k = 2,09$ car il y a 20 mesures,

d'où : $U(v) = 2,09 \times \frac{2,1}{\sqrt{20}} = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$v = (339 \pm 1) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

3. La célérité du son dans l'air dépend essentiellement de la température et ne dépend pas de la fréquence.

20 Où se trouve la baleine ?

Le temps mis par le son pour atteindre le capteur sous-marin est t_1 . On a $d = v_1 \cdot t_1$.

Le temps mis par le son pour atteindre le capteur dans l'air est t_2 . On a $d = v_2 \cdot t_2$.

On en déduit : $v_1 \cdot t_1 = v_2 \cdot t_2$.

De plus, $t_2 - t_1 = \Delta t$.

Il vient donc :

$$t_1 = \frac{v_2 \cdot \Delta t}{v_1 - v_2} = \frac{340 \times 6,71}{1140} = 2,00 \text{ s},$$

d'où $t_1 = 2,00 \text{ s}$ et $d = 2,00 \times 1480 = 2,96 \times 10^3 \text{ m}$.

21 Le son du diapason

1. La longueur d'onde et la fréquence sont liées par la relation :

$$\lambda_{\text{air}} = \frac{v}{f} = \frac{340}{880} = 0,386 \text{ m.}$$

2. Soit Δt_{air} la durée au bout de laquelle une personne située à 10 m perçoit le son. Le son a parcouru la distance d à la vitesse v_{air} en :

$$\Delta t_{\text{air}} = \frac{d}{v_{\text{air}}} = \frac{10}{340} = 2,9 \times 10^{-2} \text{ s.}$$

La personne reçoit le son quasiment au moment de son émission.

3. L'intensité sonore et le niveau d'intensité sonore sont liés par la relation $L = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$.

$$\text{Donc : } L = 10 \cdot \log\left(\frac{1,0 \times 10^{-10}}{1,0 \times 10^{-12}}\right) = 20 \text{ dB.}$$

4. L'intensité sonore reçue par cette personne sera $I = 3,0 \times 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

$$\text{On aura alors } L = 10 \cdot \log\left(\frac{3,0 \times 10^{-10}}{1,0 \times 10^{-12}}\right) = 25 \text{ dB.}$$

22 Télémètre à ultrasons ou télémètre à infrarouges ?

1. Les ultrasons sont des ondes mécaniques, les infrarouges des ondes électromagnétiques. Elles ne sont pas de même nature.

2. La plus petite longueur d'onde (900 nm) est celle de l'onde utilisée dans le télémètre à IR, celle à 9,00 mm est utilisée dans le télémètre à US.

3.

Télémètre à IR	Ondes électromagnétiques	Très directif	Mesure un angle
Télémètre à US	Ondes mécaniques	Évasif	Mesure une durée

$$4. \text{ a. } \Delta t = \frac{d}{v} = \frac{6,00}{340} = 1,76 \times 10^{-2} \text{ s.}$$

La durée entre l'émission et la réception des US pour un objet situé à 3,00 m est de $1,76 \times 10^{-2} \text{ s}$.

$$\text{b. } \Delta t = \frac{d}{c} = \frac{6,00}{2,00 \times 10^8} = 2,00 \times 10^{-8} \text{ s.}$$

La durée mesurée avec un télémètre à IR serait de $2,00 \times 10^{-8} \text{ s}$.

5. L'horloge pour mesurer une telle durée devrait être extrêmement précise. Il est donc plus pratique, et plus économique, de mesurer un angle.

23 La propagation d'une onde

1. En mesurant la distance entre un grand nombre de lignes de crêtes consécutives, on limite les imprécisions de mesure.

2. La distance entre neuf lignes de crêtes consécutives est de 8,1 cm, la longueur d'onde est donc de 1,0 cm, soit 0,010 m.

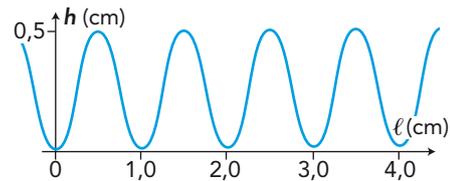
$$3. \text{ a. } v = \lambda \cdot f \\ v = 0,010 \times 25 = 0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

4. a. La longueur d'onde est la distance entre deux maxima ; on retrouve 1 cm.

b. L'amplitude est de 0,5 cm.

5. a. Au bout de $t = 0,04 \text{ s}$ (soit une période), on retrouve la même allure de la surface de l'eau.

b. Au bout de $t = 0,06 \text{ s}$, la surface de l'eau a l'allure suivante :



24 La ola au stade

1. L'onde est caractérisée par le passage d'une perturbation parmi des *particules* (spectateurs ou molécules d'eau dans ces exemples).

Comme cette perturbation passe « à travers » les particules sans les emporter, on dit qu'une onde se propage plutôt qu'elle se déplace.

2. Si l'on reprend l'exemple des tribunes du stade, la perturbation se propage grâce aux spectateurs : il ne peut pas y avoir de ola dans un stade vide.

De même, si on jette une pierre sur une surface solide plutôt que liquide, notre œil ne perçoit pas d'onde qui se propage.

Ces ondes nécessitent donc la présence d'un milieu matériel (l'ensemble des spectateurs ou de l'eau, par exemple) pour se propager.

3. Si l'on place un bouchon de liège à la surface d'un lac, le bouchon reste immobile.

Si on jette une pierre dans l'eau à proximité du bouchon, on voit les vagues se propager en cercles concentriques, et le bouchon se déplacer lorsque les vagues le soulèvent. Quand la surface du lac redevient immobile, le bouchon se trouve dans la position qu'il occupait avant que l'on jette la pierre. Il y a propagation d'une onde sans déplacement de matière.

4. Il s'agit d'une onde progressive à deux dimensions, car elle se propage sur une surface.

25 Quel son ?

1. La fréquence minimale lue est de 180 Hz, les autres sont de 360 et 540 Hz.

2. Ces fréquences sont des multiples de 180 Hz.

3. a. Le signal sinusoïdal associé à la plus basse fréquence est appelé fondamental.

b. Les autres signaux, avec le fondamental, constituent les harmoniques.

4. Ces sons n'ont pas le même timbre, car ils ne contiennent pas les mêmes harmoniques.

26 À chacun son rythme

$$1. \text{ a. } T = 5,1 \text{ div} \times 5,0 \mu\text{s/div} = 25,5 \mu\text{s}$$

La période de l'onde est de 25,5 μs .

$$\text{b. } U(T) = 0,1 \text{ div} \times 5,0 \mu\text{s/div} = 1,0 \mu\text{s}$$

On peut donc écrire $T = (25,5 \pm 1,0) \mu\text{s}$.

$$2. \text{ a. } \lambda = \frac{d}{10} = \frac{8,5}{10} = 0,85 \text{ cm}$$

$$\text{b. } U(\lambda) = \frac{U(d)}{10} = \frac{0,1}{10} = 0,01 \text{ cm}$$

On peut donc écrire que $\lambda = (0,85 \pm 0,01) \text{ cm}$.

$$3. \text{ a. } v = \frac{\lambda}{T}$$

$$\text{b. } v = \frac{0,85 \times 10^{-2}}{25,5 \times 10^{-6}}$$

$$v = 3,3 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

La vitesse des ultrasons est de $3,3 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

$$U(v) = v \cdot \sqrt{\left(\frac{U(\lambda)}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{U(T)}{T}\right)^2}$$

$$U(v) = 340 \times \sqrt{\left(\frac{0,01}{0,85}\right)^2 + \left(\frac{1,0}{25,5}\right)^2} = 1 \times 10^1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

On peut donc écrire $v = (3,3 \pm 0,1) \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Pour aller plus loin

27 Mesure d'une vitesse d'écoulement

1. Lorsque l'émetteur est en amont, la valeur de la vitesse de l'onde ultrasonore est :

$$v_1 = v_0 + v_f$$

Lorsqu'il est en aval :

$$v_2 = v_0 - v_f$$

2. La distance parcourue et la durée de parcours sont liées par :

$$\Delta t_1 = \frac{D}{v_1} = \frac{D}{v_0 + v_f}$$

De même :

$$\Delta t_2 = \frac{D}{v_2} = \frac{D}{v_0 - v_f}$$

La valeur de la vitesse v_1 est plus grande que la valeur de la vitesse v_2 , donc la durée Δt_1 , lorsque l'émetteur est en amont, sera plus faible ; l'onde est « portée » par le fluide.

3. On calcule :

$$\Delta t = \Delta t_2 - \Delta t_1 = \frac{D}{v_0 - v_f} - \frac{D}{v_0 + v_f}$$

$$\Delta t = \frac{D \cdot (v_0 + v_f) - D \cdot (v_0 - v_f)}{(v_0 - v_f)(v_0 + v_f)} = \frac{2D \cdot v_f}{v_0^2 - v_f^2}$$

4. On obtient l'équation du second degré :

$$\Delta t \cdot v_f^2 + 2D \cdot v_f - v_0^2 \cdot \Delta t = 0$$

soit :

$$2,32 \times 10^{-6} \times v_f^2 + 3,96 \times v_f - 1480^2 \times 2,32 \times 10^{-6} = 0.$$

Par application numérique, on trouve $v_f = 1,28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

5. Il faut connaître la valeur de la distance D , entre l'émetteur et le récepteur, le plus précisément possible. La mesure des deux durées est aussi source d'erreur, tout comme la valeur de v_0 .

28 Accorder ses violons

1. Le microphone va capter les sons ambiants et l'appareil ne pourra pas analyser la fréquence de la note jouée.

2. Les « vibrations » sont les ondes qui se sont propagées dans le matériau du violon.

3. Ces « vibrations » doivent avoir la même hauteur que le son musical.

29 Accorder une guitare avec un diapason

1. Pour la note émise par la guitare, le fondamental a une fréquence de 107 Hz et les autres harmoniques ont pour fréquences 214 Hz, 321 Hz et 428 Hz.

2. Le son du diapason a une fréquence de 440 Hz.

3. L'amplitude de la tension enregistrée n'est pas constante, on observe des variations à l'origine des battements que l'on peut entendre.

4. La fréquence de la note émise par la guitare est de 100 Hz alors qu'elle devrait être de 110 Hz. La corde n'est pas accordée.

5. La fréquence du fondamental est de 110 Hz, les autres harmoniques ont pour fréquences 220 Hz, 330 Hz et 440 Hz. L'harmonique à 440 Hz se superpose avec le signal du diapason.

6. La corde est accordée, car elle émet un son à 110 Hz.

Complément

La fréquence initiale de la note émise par la guitare (107 Hz avec un autre harmonique à 428 Hz) et celle émise par le diapason (440 Hz) sont trop éloignées pour que les battements soient facilement audibles. Ils le sont davantage si les fréquences sont bien plus proches (109,5 Hz avec un autre harmonique à 438 Hz et 440 Hz, par exemple).

30 Les ondes sismiques

1. Les ondes P sont des ondes longitudinales : les zones de compressions/dilatations se déplacent dans la même direction que celle de l'onde.

Les ondes S sont des ondes transversales : le cisaillement des roches se fait dans une direction perpendiculaire à la direction de l'onde.

Les ondes L sont des ondes transversales : la perturbation se propage dans un plan horizontal perpendiculairement à la direction de l'onde.

2. Les ondes qui se propagent à la surface de l'eau sont des ondes transversales.

$$3. v = \frac{d}{\Delta t}$$

donc $\Delta t = \frac{d}{v}$ avec d en km, v en $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$, donc Δt en s,

$$\text{soit : } \Delta t = \frac{d}{v_p} = \frac{833}{6,0} = 139 \text{ s} \approx 1,4 \times 10^2 \text{ s}.$$

4. À partir du graphique, on lit :

$$x_{\text{max}} = 3,0 \text{ cm}, T = 0,10 \text{ s} \text{ et } \Phi = 0 \text{ rad}.$$

$$5. x(t) = 3,0 \times \cos\left(\frac{2\pi}{0,10} \times t\right), \text{ avec } x \text{ en cm et } t \text{ en s}.$$

$$6. v_s = \frac{\lambda}{T}$$

$$d'où \lambda = v_s \cdot T = 4,0 \times 10^3 \times 0,10 = 4,0 \times 10^2 \text{ m}.$$

31 Three sounds

Traduction du texte et des questions :

« Un microphone est connecté à un oscilloscope. Trois sons sont enregistrés par le micro avec les mêmes réglages. Les tracés **A**, **B** et **C** sont produits durant cette expérience.

1. Quel tracé correspond au son le plus fort ? Justifier.

2. Quel tracé correspond au son le plus bas ? Justifier. »

1. Le son le plus fort correspond au signal **C**, car l'amplitude est la plus grande.

2. La hauteur d'un son musical est liée à sa fréquence. Plus la fréquence est petite, plus la hauteur du son est faible.

Le signal de plus bas (de plus faible fréquence) est celui qui a la plus grande période, car la fréquence et la période sont inverses l'une de l'autre.
Le signal **A** correspond au son le plus bas.

32 La piscine

1. A est l'amplitude de l'onde, T_0 sa période temporelle et Φ la phase à l'origine.
La période est l'inverse de la fréquence, soit ici $T_0 = 0,40$ s.

2. On prend $x = 5,8$ m et $t = 10$ s et on calcule la valeur de z correspondante :

$$z(10) = 1,5 \times \cos\left(\frac{2\pi}{0,40} \times 10 + \frac{\pi}{2}\right) = 0 \text{ cm.}$$

3. Pour que le ballon soit au niveau zéro, il faut que :

$$z(t) = 1,5 \times \cos\left(\frac{2\pi}{0,40} \times t + \frac{\pi}{2}\right) = 0$$

soit :

$$\cos\left(\frac{2\pi}{0,40} \times t + \frac{\pi}{2}\right) = 0$$

$$\frac{2\pi}{0,40} \times t + \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{2} + k\pi$$

d'où $t = \frac{0,40 \times k}{2}$ avec k un entier.

Par exemple, $t = 0,2$ s ; $0,4$ s ; $0,6$ s ; $0,8$ s ; $1,0$ s ; $1,2$ s ; $1,4$ s.

33 QCM sur les ondes sonores

1. A. 2. A. 3. A et B. 4. A.

Retour sur l'ouverture du chapitre

34 L'oreille humaine en concert

1. La hauteur du son est la sensation liée à la fréquence du fondamental de ce son.

2. $T = 2,0$ ms, donc $f = 500$ Hz.

3. L'amplitude de la tension a doublé. L'ingénieur a modifié l'intensité sonore du son. Le son a toujours la même période, donc la même fréquence.

4. Le fondamental sur l'enregistrement 3 a une fréquence de 500 Hz, donc la même fréquence que les sons des enregistrements 1 et 2.

5. C'est le timbre du son qui a été modifié. En effet, il s'agit, sur l'enregistrement 3, d'un son ayant beaucoup d'harmoniques, alors que les signaux des enregistrements 1 et 2 sont des sinusoides, donc des sons purs avec un seul harmonique.

6. À 16 mètres, $I = I_0 \cdot 10^{\frac{L}{10}}$
 $I = 10^{-12} \times 10^{\frac{98}{10}} = 6,3 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

7. $I_2 = 10 \times I = 6,3 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

$$L_2 = 10 \times \log\left(\frac{I_2}{I_0}\right)$$

$$L_2 = 10 \times \log\left(\frac{6,3 \times 10^{-2}}{10^{-12}}\right) = 108 \text{ dB}$$

8. À 16 mètres, $L = 10 \times \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$.

À 8 mètres, $I' = 4 \times I$.

$$L' = 10 \times \log\left(\frac{4 \times I}{I_0}\right)$$

$$L' = 10 \times \log 4 + 10 \times \log\left(\frac{I}{I_0}\right) = 6 + L.$$

Le niveau d'intensité sonore augmente de 6 dB lorsque la distance est divisée par 2.

Le son devient douloureux à écouter à partir de 120 dB, c'est-à-dire à partir de 4 mètres.

En effet, $120 \text{ dB} = (108 + 6 + 6) \text{ dB}$; la distance a été divisée par 4.

9. Près des enceintes, le niveau sonore peut dépasser le seuil de risques. Cette exposition à un niveau sonore trop élevé peut provoquer des acouphènes, voire engendrer une perte d'audition.

Comprendre un énoncé

35 Propagation d'une onde le long d'une corde

1. La valeur de la vitesse de propagation d'une onde est le rapport de la distance d qu'elle parcourt par la durée Δt mise par l'onde pour parcourir cette distance.

$$v = \frac{d}{\Delta t}$$

Entre la photo n° 2 et la photo n° 4, il s'est écoulé $2 \times 0,25 = 0,50$ s et la perturbation a parcouru 1,00 m :

$$v = \frac{1,00}{0,50} = 2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

2. Le premier schéma montre que la perturbation a une longueur de 0,50 m (lue sur l'axe des abscisses). La durée est déterminée par :

$$\Delta t_{\text{perturbation}} = \frac{\ell}{v} = \frac{0,50}{2,0} = 0,25 \text{ s.}$$

3. Le point A est atteint le premier par la perturbation, car il est atteint à la date 1,50 s alors que le point B l'est à la date 2,00 s.

4. Le point A est le plus proche de la source, car la perturbation l'atteint en premier.

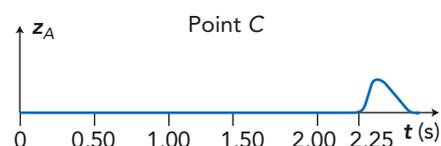
5. Le retard du point B par rapport au point A est déterminé par la lecture des graphiques.

On obtient : $\Delta t = 2,00 - 1,50 = 0,50$ s.

6. $d_{AB} = v \cdot \Delta t = 2,0 \times 0,50 = 1,0$ m.

7. L'allure de la perturbation est inversée, car sur la chronophotographie le front de la perturbation atteint le point le plus proche avant d'atteindre le point le plus éloigné.

8.



Propriétés des ondes

Activités

1 Approche historique du caractère ondulatoire de la lumière (p. 62)

1 I. NEWTON observe que la lumière est constituée de radiations colorées.

C. HUYGENS interprète les observations faites par I. NEWTON et en déduit le caractère ondulatoire de la lumière.

T. YOUNG met en évidence les phénomènes de diffraction et d'interférences confirmant le caractère ondulatoire de la lumière.

J. VON FRAUNHOFER met au point le spectroscopie et observe des spectres.

C. DOPPLER prévoit le décalage des ondes lorsque qu'il y a un mouvement relatif de l'émetteur par rapport au récepteur.

C. BUYS-BALLOT vérifie expérimentalement la théorie de C. DOPPLER pour le son.

H. FIZEAU prévoit que la théorie de C. DOPPLER peut s'étendre à la lumière des étoiles.

2 Listes des phénomènes physiques étudiés :

Scientifique	Phénomène physique
I. NEWTON	Dispersion de la lumière
C. HUYGENS	Caractère ondulatoire de la lumière
T. YOUNG	Diffraction et interférences de la lumière
J. VON FRAUNHOFER	Spectroscopie de la lumière
C. DOPPLER, C. BUYS-BALLOT, H. FIZEAU	Effet Doppler

3 Les appareils d'observation n'étaient pas suffisamment précis pour pouvoir vérifier l'effet Doppler-Fizeau.

2 Diffraction de la lumière (p. 63)

A Étude qualitative

1 Sur l'écran, on observe une alternance de zones lumineuses et de zones sombres dans une direction perpendiculaire à celle de la fente. C'est une « figure de diffraction ».

2 En l'absence de fente, on observe une tache lumineuse. Il y a donc des zones éclairées par la figure de diffraction qui ne le sont pas en l'absence de fente.

▶ Avec un fil, on observe la même figure de diffraction que celle obtenue avec une fente.

▶ Avec un trou circulaire, on observe une tache centrale très lumineuse entourée d'anneaux concentriques alternativement sombres et lumineux.

B Étude quantitative

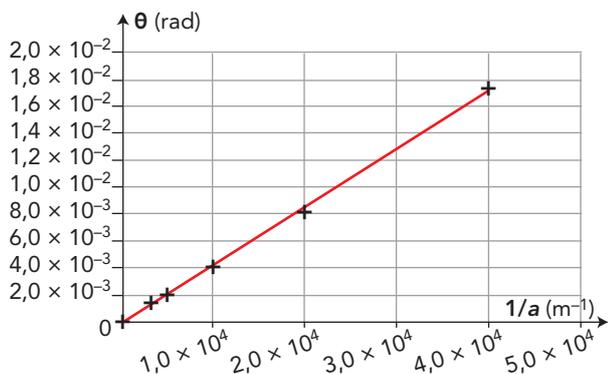
3 $\tan \theta = \frac{\ell}{2D} \approx \theta$

4 a. Le résultat des mesures est regroupé dans le tableau ci-dessous :

a ($\times 10^{-3}$ m)	0,300	0,200	0,100	0,0500	0,0250
ℓ ($\times 10^{-3}$ m)	13	19	37	73	156

Avec un tableur, on obtient les résultats suivants :

a (m)	ℓ (m)	D (m)	θ (rad)	$1/a$ (m^{-1})
3,00E-04	1,30E-02	4,50	1,4E-03	3,33E+03
2,00E-04	1,90E-02	4,50	2,1E-03	5,00E+03
1,00E-04	3,70E-02	4,50	4,1E-03	1,00E+04
5,00E-05	7,30E-02	4,50	8,1E-03	2,00E+04
2,50E-05	1,56E-01	4,50	1,7E-02	4,00E+04



La courbe obtenue est une droite qui passe par l'origine. θ est donc proportionnel à $\frac{1}{a}$: $\theta = k \cdot \frac{1}{a}$.

b. La modélisation donne $\theta = 4,2 \times 10^{-7} \times \frac{1}{a}$.

Le coefficient directeur k est homogène à une longueur.

Sa valeur correspond à la longueur d'onde λ du laser utilisé.

5 On trouve $\theta = \frac{\lambda}{a}$; θ est l'écart angulaire entre le milieu de la tache centrale et le milieu de la première extinction, en radian, λ la longueur d'onde en m et a la largeur de la fente en m.

6 On réalise la même expérience que précédemment en utilisant un laser dont on ne connaît pas la longueur d'onde et une fente dont on connaît la largeur a . Exemple : $a = 1,00 \times 10^{-4}$ m.

On mesure la distance fente-écran, ainsi que la largeur de la tache centrale :

- distance fente-écran : $D = 4,50$ m ;
- largeur de la tache centrale : $\ell = 57$ mm.

On en déduit : $\lambda' = \frac{a \cdot \ell}{2D} = 6,33 \times 10^2$ nm.

7 a. D'après la notice :

$$U(a) = 1,5 \% \text{ de la valeur annoncée} \\ = 1,5 \times 10^{-6} \text{ m, soit } 0,002 \text{ mm.}$$

$$U(\ell) = \sqrt{2} \times \frac{2 \times 1}{\sqrt{12}} = 0,8 \text{ mm} = 1 \text{ mm}$$

$$U(D) = \sqrt{2} \times \frac{2 \times 1}{\sqrt{12}} = 0,8 \text{ cm} = 1 \text{ cm}$$

$$\text{b. } U(\lambda') = \lambda' \cdot \sqrt{\left(\frac{U(a)}{a}\right)^2 + \left(\frac{U(\ell)}{\ell}\right)^2 + \left(\frac{U(D)}{D}\right)^2}$$

$$U(\lambda') = 6,33 \times 10^2 \times \sqrt{\left(\frac{0,002}{0,100}\right)^2 + \left(\frac{1}{57}\right)^2 + \left(\frac{1}{450}\right)^2}$$

$$U(\lambda') = 17 \text{ nm}$$

c. $\lambda' \in [616 \text{ nm}; 650 \text{ nm}]$. Cela est conforme à la valeur indiquée par le fabricant : 632,8 nm.

3 Interférences lumineuses (p. 64)

A Étude quantitative

Complément

Pour les fentes d'Young, on utilise du matériel Ovio pour lequel les valeurs de b sont 0,200 mm, 0,300 mm et 0,500 mm, avec une précision de 1 μm . L'écran est placé à une distance de 4,00 m.

1 On observe des franges d'interférences, alternativement sombres et brillantes sur l'écran. Ces franges sont parallèles entre elles et parallèles aux deux fentes d'Young.

2 a. Avec un tableur, on obtient :

$b \text{ (m)}$	$i \text{ (m)}$	$\frac{1}{b} \text{ (m}^{-1}\text{)}$
2,00E-04	1,2E-02	5,00E+03
3,00E-04	8,4E-03	3,33E+03
5,00E-04	5,0E-03	2,00E+03

On trace la courbe donnant les variations de i en fonction de $\frac{1}{b}$. On obtient une droite qui passe par l'origine (voir ci-contre); i est donc proportionnel à $\frac{1}{b}$.

b. Les deux premières expressions sont à exclure, car il n'y a pas de proportionnalité entre i et $\frac{1}{b}$.

La dernière relation est également à exclure, car i n'est pas homogène à une longueur.

Seule la troisième relation est conforme : $i = \frac{\lambda \cdot D}{b}$.

3 On n'observe pas de figure d'interférences à partir de deux lasers identiques éclairant une même zone de l'écran.

$$\text{4 } i = \frac{\lambda \cdot D}{b}$$

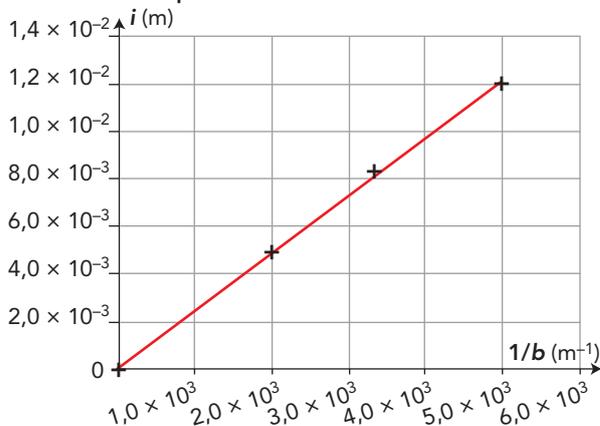
i : interfrange en m.

λ : longueur d'onde de la source en m.

b : largeur de l'interfente en m.

D : distance écran-fentes en m.

Courbe de la réponse 2a



B Application à la détermination du pas d'un réseau

5 On remplace les fentes d'Young par un réseau 100 traits/mm.

On utilise un laser $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ avec une précision de $0,2 \text{ nm}$.

On se place à une distance $D = 2,00 \text{ m}$ de l'écran.

On mesure l'interfrange $i = 12,5 \text{ cm}$.

$$b = \frac{\lambda \cdot D}{i} = \frac{632,8 \times 10^{-9} \times 2,00}{12,5 \times 10^{-2}} = 1,01 \times 10^{-5} \text{ m}$$

6 a. $U(\lambda) = 0,2 \text{ nm}$

$$U(i) = \sqrt{2} \times \frac{2 \times 1}{\sqrt{12}} = 0,8 \text{ mm} = 1 \text{ mm}$$

$$U(D) = \sqrt{2} \times \frac{2 \times 1}{\sqrt{12}} = 0,8 \text{ cm} = 1 \text{ cm}$$

$$b. U(b) = b \cdot \sqrt{\left(\frac{U(\lambda)}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{U(i)}{i}\right)^2 + \left(\frac{U(D)}{D}\right)^2}$$

$$U(b) = 1,00 \times 10^{-5} \times \sqrt{\left(\frac{0,2}{632,8}\right)^2 + \left(\frac{1}{125}\right)^2 + \left(\frac{1}{200}\right)^2}$$

$$U(b) = 1 \times 10^{-7} \text{ m} = 1 \times 10^{-4} \text{ mm}$$

c. $b = (1,01 \times 10^{-2} \pm 0,01 \times 10^{-2}) \text{ mm}$

ou $b \in [1,00 \times 10^{-2}; 1,02 \times 10^{-2}]$

b est conforme à l'indication du fabricant :

$1,01 \times 10^{-2} \text{ mm}$.

4 Effet Doppler (p. 65)

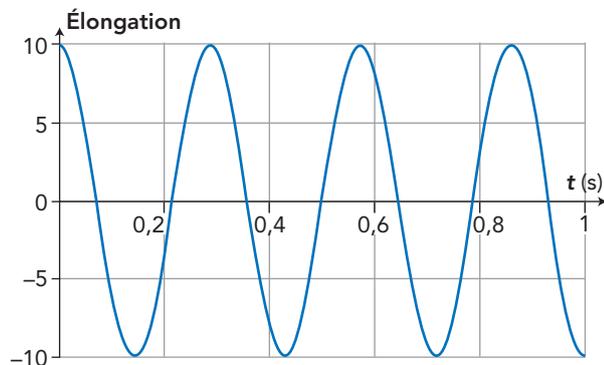
1 Il fait référence à la longueur d'onde du son.

2 a. $v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$

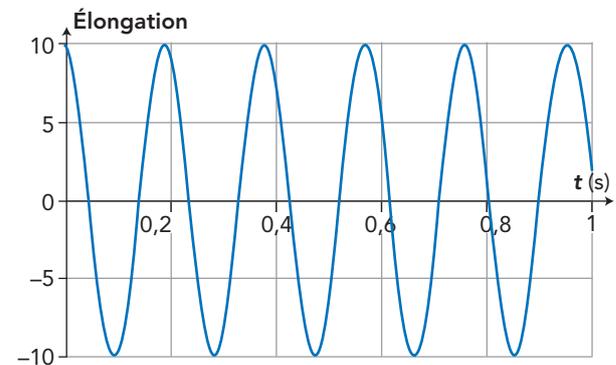
b. Un son aigu a une fréquence plus élevée qu'un son grave.

c. D'après la relation 2a, pour une même vitesse de propagation, si la longueur d'onde est plus faible, la fréquence est plus élevée, donc le son est plus aigu.

3 a. Élongation du niveau de l'eau vue par la grenouille immobile :



b. Élongation du niveau de l'eau vue par le cygne se rapprochant de la source :



4 Une onde émise avec une fréquence f_E est perçue avec une fréquence f_R différente lorsque l'émetteur et le récepteur sont en déplacement relatif : c'est l'effet Doppler.

Par exemple, le son de la sirène d'une ambulance est perçu plus aigu lorsque celle-ci se rapproche.

5 Mesure de la valeur d'une vitesse par effet Doppler (p. 66)

A Étude expérimentale

Complément

Le matériel utilisé a été développé par JCL électronique (<http://www.electrome.fr/>).

1 Pour déterminer la valeur de la vitesse du véhicule, il faut mesurer le décalage de fréquence du son émis par un émetteur lorsqu'il est immobile et lorsqu'il est en mouvement.

On dispose d'un émetteur à ultrason, jouant le rôle du véhicule, pouvant se déplacer sur un rail.

Au milieu du rail se trouve une fourche optique pouvant déclencher une acquisition (ordinateur ou oscilloscope numérique).

On réalise une première acquisition avec l'émetteur immobile afin de déterminer la fréquence f_E des ultrasons émis. Ensuite, on réalise différentes acquisitions avec l'émetteur s'approchant ou s'éloignant du récepteur afin de déterminer la fréquence f_R perçue.

2

Mesures Automatiques		Mesures Automatiques		Mesures Automatiques	
EA0		EA0		EA0	
Valeur Mini :	-0.432 V	Valeur Mini :	-0.427 V	Valeur Mini :	-0.238 V
Valeur Maxi :	0.427 V	Valeur Maxi :	0.417 V	Valeur Maxi :	0.228 V
Valeur Maxi - Mini :	0.858 V	Valeur Maxi - Mini :	0.843 V	Valeur Maxi - Mini :	0.466 V
Valeur Moyenne :	-2.217 mV	Valeur Moyenne :	-1.855 mV	Valeur Moyenne :	-3.5 mV
Décalage signal :	-2.193 mV	Décalage signal :	-2.111 mV	Décalage signal :	-2.674 mV
Période :	25 μs	Période :	25.115 μs	Période :	24.885 μs
Fréquence (Hz) :	40 kHz	Fréquence (Hz) :	39.816 kHz	Fréquence (Hz) :	40.185 kHz
Valeur Efficace :	0.303 V	Valeur Efficace :	0.294 V	Valeur Efficace :	0.161 V

Mobile à l'arrêt : $f_E = 40,000$ kHz.

Mobile s'approchant du récepteur à la vitesse v_1 :

$$f_{R1} = 40,185 \text{ kHz.}$$

Mobile s'éloignant du récepteur à la vitesse v_2 :

$$f_{R2} = 39,816 \text{ kHz.}$$

On trouve :

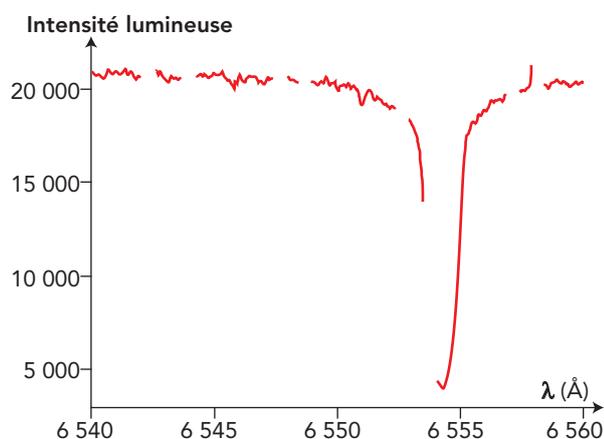
$$v_1 = 340 \times \frac{185}{40185} = 1,57 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{et } v_2 = 340 \times \frac{184}{39816} = 1,57 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Manuel numérique 2.0
Simulation : Effet Doppler.

B Application à l'astrophysique

3 Profil spectral de l'étoile HD 2665 :
J003044.7 + 570357 S 19961003/0017 OBJO 105
Entre 6540 Å et 6560 Å :



L'extremum du pic correspondant à H_α se situe à une longueur d'onde de 6554,2 Å. Ce décalage s'explique par le fait que l'étoile se rapproche de la Terre.

4 On en déduit la vitesse radiale de l'étoile :

$$v = 3,00 \times 10^8 \times \frac{|6554,2 - 6562,6|}{6562,6}$$

$$v = 384 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 384 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Cette étoile se rapproche de la Terre avec une vitesse de 384 km · s⁻¹.

5 On peut améliorer cette précision en identifiant plusieurs raies et en effectuant une moyenne à partir des valeurs calculées.

6 L'effet Doppler permet de déterminer les vitesses radiales des étoiles.

Manuel numérique 2.0
Simulation : Effet Doppler-Fizeau.

Exercices (p. 73-85)

QCM

- 1 1. A, B et C; 2. A et B; 3. B; 2 1. C; 2. B;
3. A et C; 3 1. B; 2. B.

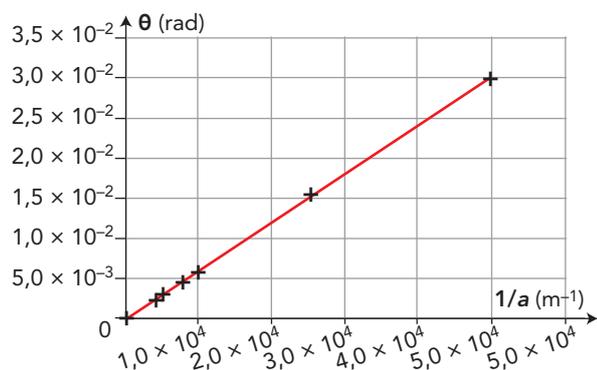
Application immédiate

4 Déterminer une longueur d'onde par interférence

- $\lambda = 635$ nm
- $U(\lambda) = 9$ nm, donc $626 \text{ nm} < \lambda < 644 \text{ nm}$.
- La valeur fournie par le constructeur est compatible avec l'encadrement obtenu.

5 Étudier expérimentalement le phénomène de diffraction

1. La représentation graphique de θ en fonction de $\frac{1}{a}$ est une droite passant par l'origine dont le coefficient directeur est 605×10^{-9} m.



2. $\lambda = 605$ nm

Pour commencer

6 Connaître le phénomène de diffraction

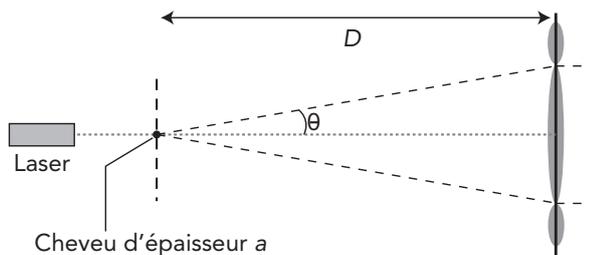
On observe une tache centrale très lumineuse entourée d'anneaux concentriques alternativement sombres et brillants.

7 Associer figure de diffraction et objet diffractant

La figure 1 est obtenue avec une fente verticale, la figure 2 avec un trou circulaire.

8 Calculer un demi-angle de diffraction

1.



$$2. \theta = \frac{\lambda}{a} = \frac{632,8 \times 10^{-9}}{50 \times 10^{-6}} = 1,3 \times 10^{-2} \text{ rad}$$

9 Connaître le phénomène d'interférences

On observe des franges d'interférences, alternativement sombres et brillantes, sur l'écran. Ces franges sont parallèles entre elles et parallèles aux deux fentes d'Young.

10 Connaître les conditions d'interférences

1. Les sources doivent être cohérentes.
2. a. $\delta = k \cdot \lambda$, avec k un nombre entier relatif.
b. $\delta = \left(k + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda$, avec k un nombre entier relatif.

11 Illustrer le phénomène d'interférences

Dans la vie courante, on observe les phénomènes d'interférences en lumière blanche : irisation sur les bulles de savon ou sur les ailes de papillon. Ce phénomène peut s'entendre avec deux haut-parleurs identiques.

12 Illustrer l'effet Doppler

Le cinémomètre routier (radar) utilise l'effet Doppler des ondes électromagnétiques pour mesurer la valeur de la vitesse des véhicules. L'échographie Doppler permet de mesurer la vitesse d'écoulement du sang dans les veines et les artères.

13 Comparer des fréquences

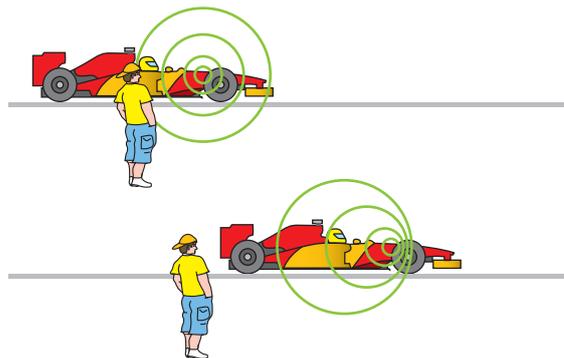
1.

Grandeur	Unité SI
f_E	s^{-1}
c et v_E	$m \cdot s^{-1}$
$\frac{c \cdot f_E}{c + v_E}$	$\frac{m \cdot s^{-1} \cdot s^{-1}}{m \cdot s^{-1}} = s^{-1}$

L'analyse dimensionnelle montre l'homogénéité de l'expression.

2. $\frac{c}{c + v_E}$ est inférieur à 1, donc la fréquence f_B est inférieure à la fréquence f_E .

14 Schématiser l'effet Doppler

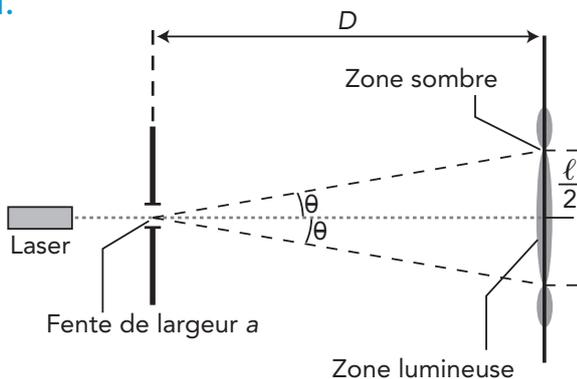


La longueur de l'onde sonore perçue par l'observateur après le passage de la voiture est plus grande, donc le son perçue sera plus grave.

Pour s'entraîner

15 Largeur d'une tache centrale

1.



2. $\theta = \frac{\lambda}{a}$

3. a. $\tan \theta = \frac{\ell}{2D} \approx \theta$

b. $\frac{\ell}{2D} \approx \frac{\lambda}{a}$, soit $\ell \approx \frac{2 \cdot \lambda \cdot D}{a}$

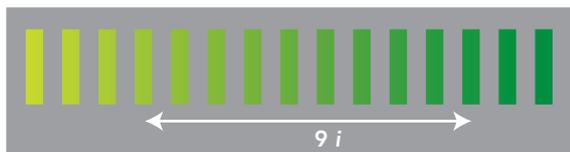
4. a. Si la largeur de la fente double, la largeur de la tache centrale est deux fois plus petite.

Si la largeur de la fente est divisée par 2, la largeur de la tache centrale double.

b. Si la distance entre la fente et l'écran double, la largeur de la tache centrale double.

16 À chacun son rythme

1. a.



La figure d'interférences est composée d'une succession de franges lumineuses équidistantes.

De la frange centrale à la dixième frange, il y a 9 interfranges :

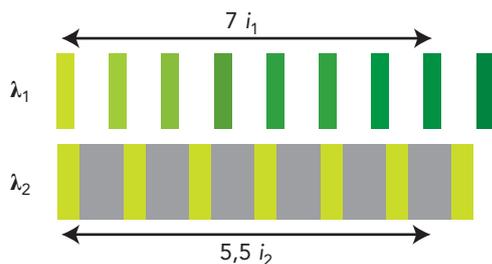
$$i_1 = \frac{9,9}{9} = 1,1 \text{ mm.}$$

b. $\lambda_1 = \frac{i \cdot b}{D} = \frac{1,1 \times 10^{-3} \times 1,0 \times 10^{-3}}{2,00} = 5,5 \times 10^{-7} \text{ m}$

2. a. De la frange centrale à la huitième frange, il y a 7 interfranges i_1 , soit 7,7 mm.

b. De la frange centrale à la sixième frange sombre, il y a 5,5 interfranges i_2 , soit :

$$i_2 = \frac{7,7}{5,5} = 1,4 \text{ mm.}$$



c. $\lambda_2 = \frac{1,4 \times 10^{-3} \times 1,0 \times 10^{-3}}{2,00} = 7,0 \times 10^{-7} \text{ m}$

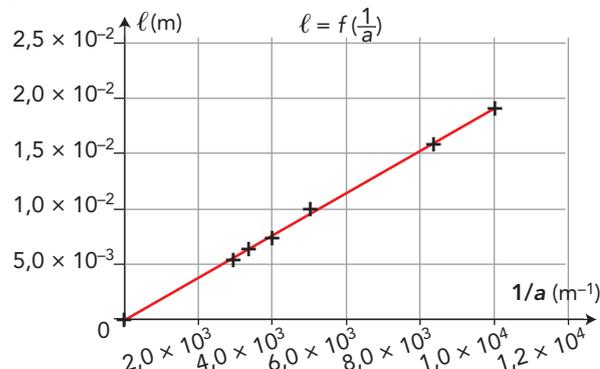
17 Mailles du voileage

1. Ce sont les interférences constructives.
2. i est l'interfrange.
3. $a = (281,3 \pm 6,5) \mu\text{m}$

18 Détermination expérimentale d'une longueur d'onde

1. On observe un phénomène de diffraction.

2. a.



b. On obtient une droite qui passe par l'origine ; ℓ est donc proportionnel à $\frac{1}{a}$; on peut écrire :

$$\ell = k \cdot \frac{1}{a}$$

3. a. $\theta = \frac{\lambda}{a}$

b. L'angle étant petit, on peut écrire $\tan \theta \approx \theta \approx \frac{\ell}{2D}$.

On en déduit :

$$\frac{\lambda}{a} \approx \frac{\ell}{2D}$$

c. $\lambda \approx a \cdot \frac{\ell}{2D} \approx \frac{k}{2D}$

Graphiquement, on détermine que $k = 1,9 \times 10^{-6} \text{ m}^2$.

$$\lambda \approx \frac{1,9 \times 10^{-6}}{2 \times 1,50} \approx 6,34 \times 10^{-7} \text{ m}$$

19 Est-ce que ça diffracte ?

1. Le phénomène de diffraction sera d'autant plus important que $\frac{\lambda}{a}$ sera grand : la diffraction sera donc plus importante pour $\lambda_1 = 1850 \text{ m}$.

2. C'est un phénomène d'interférences destructives, les ondes émises par le casque étant en opposition de phase avec celles du bruit.

3. C'est le phénomène de diffraction de la houle par l'ouverture du port.

4. Elle a une longueur d'onde inférieure à λ_1 .

20 Caractère ondulatoire de la lumière

1. On observe un phénomène de diffraction.

2. $\tan \theta = \frac{\ell}{2D} = 3,15 \times 10^{-3}$

$$\theta \approx \tan \theta, \text{ donc } \theta \approx 3,15 \times 10^{-3} \text{ rad.}$$

3. a. $\theta = \frac{\lambda}{a}$

b. $\lambda = a \cdot \theta$

$$\lambda = 0,200 \times 10^{-3} \times 3,15 \times 10^{-3} = 6,30 \times 10^{-7} \text{ m}$$

c. $U(\lambda) = \lambda \cdot \sqrt{\left(\frac{U(a)}{a}\right)^2 + \left(\frac{U(\ell)}{\ell}\right)^2 + \left(\frac{U(D)}{D}\right)^2}$

$$U(\lambda) = 630 \times \sqrt{\left(\frac{0,005}{0,2}\right)^2 + \left(\frac{0,1}{12,6}\right)^2 + \left(\frac{0,01}{2}\right)^2}$$

$$U(\lambda) = 17 \text{ nm}$$

d. $613 \text{ nm} < \lambda < 647 \text{ nm}$

4. $\lambda = \frac{c}{\nu}$, avec λ en m, c en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ et ν en Hz.

5. a. $\frac{\ell}{2D} \approx \frac{\lambda}{a}$, soit $\ell \approx \frac{2 \cdot \lambda \cdot D}{a}$

b. Longueurs d'onde dans le vide :

– des radiations bleues : $\lambda_B \approx 400 \text{ nm}$;

– des radiations rouges : $\lambda_R \approx 800 \text{ nm}$.

c. En lumière bleue, la longueur d'onde diminue, θ aussi, donc ℓ également.

Si on diminue la largeur de la fente, θ augmente et ℓ aussi.

21 Contrôle de vitesse

1. a. L'émetteur d'ondes ultrasonores et le récepteur sont fixes.

b. On utilise la réflexion des ondes ultrasonores.

c. La mesure est faite lorsque le véhicule s'approche.

d. La fréquence f_R de l'onde reçue sera supérieure à la fréquence f_E de l'onde émise.

2. $f_R = 40,280 \text{ kHz}$ et $f_E = 40,000 \text{ kHz}$.

3. a. (A) $f_E = f_R \cdot \left(2V - \frac{V}{V_S}\right)$, ce qui revient à écrire :

$$\text{Hz} = \text{Hz} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} - \text{Hz} ;$$

cette relation ne convient pas.

(B) $f_R = V \cdot \left(f_E - \frac{2V}{V_S}\right)$, ce qui revient à écrire :

$$\text{Hz} = \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz} - \text{m} \cdot \text{s}^{-1} ;$$

cette relation ne convient pas.

(C) $f_E = f_R \cdot \left(1 - \frac{2V}{V_S}\right)$, ce qui revient à écrire :

$$\text{Hz} = \text{Hz} - \text{Hz} ;$$

cette relation peut convenir.

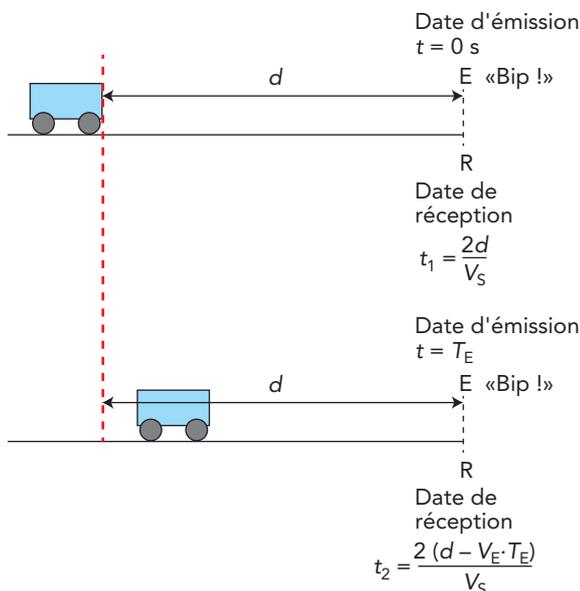
(D) $f_E = f_R \cdot \left(1 + \frac{2V}{V_S}\right)$, ce qui revient à écrire :

$$\text{Hz} = \text{Hz} + \text{Hz} ;$$

cette relation peut convenir.

La question 1d a montré que $f_R > f_E$; c'est donc la relation (C) qui convient.

b.



Deux signaux consécutifs sont reçus avec un intervalle de temps T_R tel que :

$$T_R = t_2 - t_1 = T_E + \frac{2(d - V \cdot T_E)}{V_S} - \frac{2d}{V_S} = T_E - \frac{2V \cdot T_E}{V_S}$$

$$T_R = T_E \cdot \left(1 - \frac{2V}{V_S}\right)$$

$$\frac{T_R}{T_E} = \frac{f_E}{f_R} = \left(1 - \frac{2V}{V_S}\right), \text{ soit } f_E = f_R \cdot \left(1 - \frac{2V}{V_S}\right)$$

Le nombre 2 vient du fait que la mesure se fait par réflexion.

c. $f_E = f_R \cdot \left(1 - \frac{2V}{V_S}\right)$, soit $V = \frac{V_S}{2} \cdot \left(1 - \frac{f_E}{f_R}\right)$.

$$V = \frac{340}{2} \times \left(1 - \frac{40,000}{40,280}\right) = 1,18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

4. a. La vitesse ayant une valeur constante, il suffit de déterminer la pente de la droite $x = f(\text{temps})$.

Choix de deux points de la droite :

$$(2,89; 0) \text{ et } (3,11; 0,24).$$

$$V_{\text{vidéo}} = \frac{0,24 - 0}{3,11 - 2,89} = 1,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

b. Calcul de l'erreur relative en pourcentage :

$$\left| \frac{V_{\text{vidéo}} - V}{V} \right| \times 100 = \left| \frac{1,1 - 1,18}{1,18} \right| \times 100 = 6,7 \%$$

Aux imprécisions de mesure près, les deux valeurs sont les mêmes.

22 « niiaiiian »

1. Une onde électromagnétique ou mécanique émise avec une fréquence f_E est perçue avec une fréquence f_R différente lorsque l'émetteur et le récepteur sont en déplacement relatif : c'est l'effet Doppler.

2. Les rayures verticales peuvent évoquer la propagation d'une onde plane. Les couleurs peuvent évoquer un état vibratoire. Ainsi les points des lignes d'une même couleur sont supposés être dans le même état vibratoire (comme sur une cuve à ondes) :

– les lignes noires peuvent évoquer des minima de vibration ;

– les lignes blanches des maxima.

L'écart entre les lignes d'une même couleur évoque donc la longueur d'onde.

Celle-ci diminue de gauche vers le centre, puis augmente du centre vers la droite.

Ceci évoque l'effet Doppler dans lequel une onde émise par une source en mouvement a une fréquence apparente plus grande (donc une longueur d'onde plus faible) lorsqu'elle s'approche d'un observateur fixe et une fréquence apparente plus petite (donc une longueur d'onde plus grande) lorsqu'elle s'éloigne d'un observateur fixe.

Le point blanc au centre peut suggérer l'observateur.

23 Différence de marche

1. a. En O, la différence de marche est nulle.

b. On observe une frange brillante sur l'écran.

$$2. a. \delta = \frac{0,20 \times 10^{-3} \times 6,1 \times 10^{-3}}{1,00} = 1,2 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$b. \delta = \left(k + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda = 1,2 \times 10^{-6} \text{ m, avec } k = 2;$$

on observe donc une frange sombre en P.

24 Calcul d'une longueur d'onde

1. À l'aide du schéma, on compte 10 interfranges pour la distance d .

$$\text{Ainsi, } i = \frac{d}{10} = \frac{30}{10} = 3,0 \text{ mm.}$$

2. a. Seule la relation (B) convient :

$$i = \frac{\lambda \cdot D}{b}, \text{ car } m = \frac{m \cdot m}{m}$$

b. On en déduit que $\lambda = \frac{i \cdot b}{D}$.

$$\lambda = \left(\frac{3,0 \times 10^{-3} \times 0,20 \times 10^{-3}}{1,00}\right) = 6,0 \times 10^{-7} \text{ m,}$$

soit 600 nm.

3. i est très petit, donc on mesure d plutôt que i , car cela réduit l'erreur systématique due à la méthode de mesure.

25 The Speed of Galaxy Q2125-431

Traduction du texte :

« L'effet Doppler est un phénomène physique important que les astronomes utilisent pour mesurer les vitesses de déplacement des étoiles et des galaxies. La formule de base pour des mouvements de faible vitesse (ce qui signifie des vitesses beaucoup plus faibles que celle de la lumière) est :

$$\text{vitesse} = 299792 \times \frac{\lambda_0 - \lambda_r}{\lambda_r}$$

La vitesse d'un objet en km/s s'obtient à partir de la mesure de la longueur d'onde du signal que vous observez (λ_0) et à partir de la longueur d'onde au repos du signal (λ_r), les longueurs d'onde étant mesurées en angström.

Le spectre ci-dessous est une petite partie du spectre de la galaxie Seyfert Q2125-431 dans la constellation Microscopium. Un astronome a identifié les raies spectrales de l'hydrogène alpha et bêta. »

$$1. \lambda_{0\alpha} = 7345 \text{ \AA}; \lambda_{0\beta} = 5435 \text{ \AA}.$$

$$2. V_\alpha = 299792 \times \frac{7345 - 6563}{6563} = 3,572 \times 10^4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{et } V_\beta = 299792 \times \frac{5435 - 5007}{5007} = 2,563 \times 10^4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1},$$

soit en moyenne $3,067 \times 10^4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. La vitesse radiale étant positive, cette galaxie s'éloigne de la Terre (ce qui confirme l'expansion de l'Univers).

26 Expérience historique

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

$$b. f_R = f_{\text{La dièse}} = 466 \text{ Hz}$$

$$2. f_E = f_{\text{La3}} = 440 \text{ Hz}$$

$$V_{\text{train}} = V_S \cdot \left(1 - \frac{f_E}{f_R}\right) = 340 \times \left(1 - \frac{440}{466}\right) = 19,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1},$$

soit $68,3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Pour aller plus loin

27 Détermination par effet Doppler de la vitesse d'un émetteur sonore qui s'approche

$$1. t_1 = \frac{d}{V}$$

$$2. a. d_E = V_E \cdot T_E$$

$$b. EA = d - V_E \cdot T_E$$

$$c. t_2 = T_E + \frac{d - V_E \cdot T_E}{V}$$

$$3. T_A = t_2 - t_1 = T_E + \frac{d - V_E \cdot T_E}{V} - \frac{d}{V}$$

$$T_A = T_E - \frac{V_E \cdot T_E}{V} = T_E \cdot \left(1 - \frac{V_E}{V}\right)$$

T_A est la durée entre deux signaux consécutifs captés par le récepteur; c'est donc la période de l'onde captée par le récepteur.

$$4. a. f_A = \frac{1}{T_A} = \frac{1}{T_E \cdot \left(1 - \frac{V_E}{V}\right)} = f_E \cdot \frac{V}{V - V_E}$$

$$b. V_E = V \cdot \frac{f_A - f_E}{f_A}$$

28 Détermination par effet Doppler de la vitesse d'un émetteur sonore qui s'éloigne

$$1. t_1 = \frac{d}{V}$$

$$2. a. d_E = V_E \cdot T_E$$

$$b. EB = d + V_E \cdot T_E$$

$$c. t_2 = T_E + \frac{d + V_E \cdot T_E}{V}$$

$$3. T_B = t_2 - t_1 = T_E + \frac{d + V_E \cdot T_E}{V} - \frac{d}{V}$$

$$T_B = T_E + \frac{V_E \cdot T_E}{V} = T_E \cdot \left(1 + \frac{V_E}{V}\right)$$

T_B est la durée entre deux signaux consécutifs; c'est la période de l'onde captée par le récepteur.

$$4. a. f = \frac{1}{T}$$

$$\frac{T_B}{T_E} = \frac{f_E}{f_B} = \left(1 + \frac{V_E}{V}\right)$$

$$b. V_E = V \cdot \left(\frac{f_E}{f_B} - 1\right)$$

29 L'Univers et l'effet Doppler-Fizeau

1. f_E est la fréquence d'une radiation émise par la galaxie.

f_R est la fréquence de la radiation reçue sur Terre.

V_E est la vitesse radiale de la galaxie.

V est la vitesse de la lumière.

2. Si l'émetteur s'éloigne, $\frac{f_E}{f_R} > 1$, la fréquence perçue est inférieure à celle émise.

Si l'émetteur se rapproche, $\frac{f_E}{f_R} < 1$, la fréquence perçue est supérieure à celle émise.

3. La mesure dans le spectre d'émission de la galaxie de la longueur d'onde de la radiation d'un élément connu, par exemple l'hydrogène, permet en la

comparant à la longueur d'onde de la radiation de ce même élément dans le spectre du Soleil de déterminer le mouvement de la galaxie.

La relation $\lambda = \frac{c}{f}$ permet d'écrire :

$$\frac{\lambda_R}{\lambda_E} = 1 + \frac{V_E}{V} \quad \text{ou} \quad \frac{\lambda_R}{\lambda_E} = 1 - \frac{V_E}{V}$$

Si $\frac{\lambda_R}{\lambda_E} > 1$, la galaxie s'éloigne de la Terre.

Si $\frac{\lambda_R}{\lambda_E} < 1$, la galaxie s'approche de la Terre.

4. Si les galaxies s'éloignent les unes des autres, elles doivent initialement provenir d'un même point. L'effet Doppler-Fizeau est en accord avec le Big Bang.

30 Couleurs interférentielles des colibris

1. Les interférences sont constructives si $\delta = k \cdot \lambda$, avec k un nombre entier relatif.

Elles sont destructives si $\delta = \left(k + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda$, avec k un nombre entier relatif.

2. • Pour la radiation rouge :

$$\delta_R = 2 n_R \cdot e \cdot \cos r + \frac{\lambda_R}{2}$$

$$\delta_R = 2 \times 1,33 \times 0,15 \times 10^{-6} \times \cos 20 + \frac{750 \times 10^{-9}}{2}$$

$$\delta_R = 7,5 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$\delta_R = k \cdot \lambda_R, \text{ avec } k = 1,$$

donc les interférences sont constructives.

• Pour la radiation violette :

$$\delta_V = 2 n_V \cdot e \cdot \cos r + \frac{\lambda_V}{2}$$

$$\delta_V = 2 \times 1,34 \times 0,15 \times 10^{-6} \times \cos 20 + \frac{380 \times 10^{-9}}{2}$$

$$\delta_V = 5,7 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$\delta_V = \left(k + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda_V, \text{ avec } k = 1,$$

donc les interférences sont destructives.

3. $\delta_V = 2 n_V \cdot e \cdot \cos r + \frac{\lambda_V}{2} = k \cdot \lambda_V$

$$\cos r = \frac{1}{2 n_V \cdot e} \cdot \left[\lambda_V \cdot \left(k - \frac{1}{2}\right) \right]$$

$$\cos r = \frac{1}{2 \times 1,34 \times 0,15 \times 10^{-6}} \times \left[380 \times 10^{-9} \times \frac{1}{2} \right]$$

$$\cos r = 0,473,$$

soit $r \approx 62^\circ$.

Remarque : pour $k = 2$, le rapport est supérieur à 1.

4. Lorsque l'angle d'incidence augmente, d'après la loi de Descartes, l'angle de réfraction augmente, donc la différence de marche change et la longueur d'onde pour laquelle les interférences sont constructives aussi. La couleur observée change donc quand l'angle d'incidence est modifié.

Une couleur interférentielle change lorsque l'on change l'angle d'observation. Une couleur pigmentaire est toujours identique quel que soit l'angle d'observation.

31 Exoplanètes

1. Les astrophysiciens mesurent la longueur d'onde de certaines raies d'absorption sur le spectre de la lumière émise par l'étoile.

2. La vitesse radiale moyenne est de $33,11 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Elle représente la vitesse radiale de l'étoile par rapport à la Terre.

3. a. On mesure 7 périodes en 30 jours, soit :

$$T = 4,3 \text{ j.}$$

b. Cette période semble très faible par rapport à celle de la Terre qui est de 365 jours. Cette planète est donc très proche de son étoile.

32 Spectre d'une étoile lointaine

1. Ils correspondent aux pics d'absorption des différents éléments présents dans l'atmosphère de l'étoile.

2. $\lambda = 4344,9 \text{ \AA}$

$$3. v = 3,00 \times 10^8 \times \frac{4344,9 - 4340,47}{4340,47}$$

$$v = 3,06 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 306 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$$

4. a. On observe un *redshift*, décalage vers le rouge.

b. L'étoile s'éloigne de la Terre.

33 Diffraction par un fil

$$1. \theta \approx \tan \theta = \frac{L}{2D}$$

2. $\theta = \frac{\lambda}{a}$, avec θ en radian, et λ et a en mètre.

3. La courbe $\theta = f\left(\frac{1}{a}\right)$ est une droite passant par l'origine. Or l'expression précédente montre que θ et $\frac{1}{a}$ sont proportionnels (coefficient de proportionnalité λ). La figure 2 est donc bien en accord avec la relation.

4. Le coefficient directeur de la droite représentative de $\theta = f\left(\frac{1}{a}\right)$ est égal à la longueur d'onde λ .

5. Soit le point de la droite de coordonnées $(5,0 \times 10^4 \text{ m}^{-1}; 2,8 \times 10^{-2} \text{ rad})$.

Le coefficient directeur de la droite est :

$$\lambda = \frac{2,8 \times 10^{-2}}{5,0 \times 10^4} = 5,6 \times 10^{-7} \text{ m.}$$

La valeur à retenir est $\lambda = 560 \text{ nm}$.

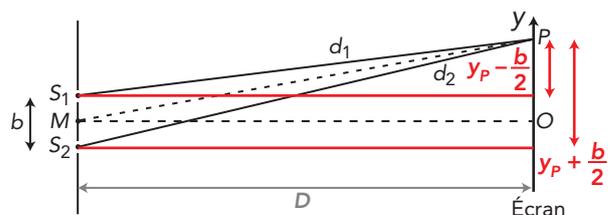
6. La lumière blanche est polychromatique, donc elle contient des radiations de longueurs d'onde différentes qui donneront des taches de largeurs et de positions différentes sur l'écran.

Au centre de l'écran, juste en face du fil, toutes les radiations colorées se superposent; on obtient du blanc.

À l'extérieur de cette tache blanche, seules certaines radiations se superposent; cela crée des zones colorées : des irisations.

34 Les lambdamètres

1. a. On note $\delta = d_2 - d_1$ la différence de marche entre les deux rayons lumineux.



d_1 et d_2 exprimés à l'aide du théorème de Pythagore dans les triangles rectangles correspondants donnent :

$$d_1 = \sqrt{D^2 + \left(y_P - \frac{b}{2}\right)^2}$$

Retour sur l'ouverture du chapitre

$$d_2 = \sqrt{D^2 + \left(y_P + \frac{b}{2}\right)^2}$$

$$\text{d'où } d_2 - d_1 = \sqrt{D^2 + \left(y_P + \frac{b}{2}\right)^2} - \sqrt{D^2 + \left(y_P - \frac{b}{2}\right)^2}$$

b. On obtient :

$$\delta = D \cdot \left(\sqrt{1 + \left(\frac{y_P + \frac{b}{2}}{D}\right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{y_P - \frac{b}{2}}{D}\right)^2} \right)$$

avec $y_P \pm \frac{b}{2} \ll D$, donc $\varepsilon = \left(\frac{y_P + \frac{b}{2}}{D}\right)$ et $\varepsilon' = \left(\frac{y_P - \frac{b}{2}}{D}\right)$ très petits.

c. En appliquant l'approximation, on obtient :

$$\delta = D \cdot \left[1 + \left(\frac{y_P + \frac{b}{2}}{D}\right)^2 - 1 - \left(\frac{y_P - \frac{b}{2}}{D}\right)^2 \right]$$

$$\delta = \frac{1}{D} \cdot \left(y_P + \frac{b}{2} - y_P + \frac{b}{2}\right) \cdot \left(y_P + \frac{b}{2} + y_P - \frac{b}{2}\right)$$

$$\delta = \frac{b \cdot y_P}{D}$$

2. Il y a interférences constructives si δ est égal à un nombre entier de longueurs d'onde λ .

On observe donc des franges brillantes pour $y_P = 0$, c'est-à-dire sur l'axe optique du système, puis pour :

$$y_1 = \frac{\lambda \cdot D}{b}; \quad y_2 = 2 \frac{\lambda \cdot D}{b}; \quad y_3 = 3 \frac{\lambda \cdot D}{b}; \quad \text{etc.}$$

Il y a interférences destructives si δ est égal à un nombre impair de demi-longueurs d'onde. On observe alors des franges sombres pour :

$$y_1' = \frac{\lambda \cdot D}{2b}; \quad y_2' = 3 \frac{\lambda \cdot D}{2b}; \quad y_3' = 5 \frac{\lambda \cdot D}{2b}; \quad \text{etc.}$$

D'après ce qui précède, la distance entre deux franges brillantes ou entre deux franges sombres consécutives, appelée interfrange i , s'écrit :

$$i = \frac{\lambda \cdot D}{b}$$

La mesure de i à partir de D et b permet de déterminer expérimentalement la longueur d'onde de la lumière monochromatique utilisée :

$$\lambda = \frac{i \cdot b}{D}$$

35 Bulles de savon et iridescence

1. Les ondes sont cohérentes, car elles sont issues de la même source.

2. Pour qu'il y ait interférences constructives, la différence de marche δ doit être un nombre entier de longueurs d'onde :

$$\delta = 2n \cdot e + \frac{\lambda}{2} = k \cdot \lambda,$$

soit : avec $k = 1$, $e = \frac{\lambda}{4n}$

3. a. $e = \frac{1}{2} \times \frac{633 \times 10^{-9}}{2 \times 1,35} = 1,17 \times 10^{-7} \text{ m} = 117 \text{ nm}$

b. $e = \frac{1}{2} \times \frac{488 \times 10^{-9}}{2 \times 1,35} = 9,04 \times 10^{-8} \text{ m} = 90,4 \text{ nm}$

4. Les couleurs dépendent de l'épaisseur du film.

5. À cause de la pesanteur, l'épaisseur est plus fine au-dessus de la bulle que sur le bas de la bulle.

Comprendre un énoncé

36 Radar... et effet Doppler

1. $\lambda' = \lambda - v \cdot T$ et $\lambda = \frac{c}{f}$

Par suite :

$$\frac{c}{f'} = \frac{c}{f} - \frac{v}{f'} \quad \text{soit } f' = f \cdot \frac{c}{c - v}$$

2. $\frac{c}{c - v} > 1$, donc $f' > f$:

le son perçu est donc plus aigu que le son émis.

3. D'après la relation de la question 1 :

$$f' \cdot (c - v) = f \cdot c$$

$$f' \cdot c - f \cdot c = f' \cdot v$$

$$v = \frac{c \cdot (f' - f)}{f'}$$

$$v = \frac{340 \times (716 - 680)}{716} = 17,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 61,5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

4. a. $\lambda'' = \lambda + v \cdot T$ et $f'' = f \cdot \frac{c}{c + v}$

b. $\frac{c}{c + v} < 1$, donc $f'' < f$:

le son perçu est donc plus grave que le son émis.

Analyse spectrale

Activités

1 Tracé et analyse de spectres UV-visible (p. 88)

A Analyse de quelques spectres

1 et 2

Numéro de la courbe	1	2	3	4	5
Couleur de la solution	Jaune	Orangé	Rouge	Violet	Bleu vert
λ_{\max} (nm)	400	430	520	550	720
Couleur de la radiation absorbée	Violet	Bleu	Vert	Jaune	Rouge

3 Lorsqu'une espèce chimique n'absorbe que dans un seul domaine de longueurs d'onde du visible, sa couleur est la couleur complémentaire de celle des radiations absorbées.

B Étude de solutions colorées

4 et 5 Il suffit de tracer le spectre $A = f(\lambda)$ pour les diverses solutions proposées en faisant le blanc du spectrophotomètre avec le solvant utilisé pour préparer les solutions. En cas de saturation de l'appareil, les élèves devront diluer les solutions étudiées.

Pour cela, il faudra utiliser :

- un spectrophotomètre et ses cuves ;
- une solution de vert de malachite ;
- une solution de chlorure de chrome (III) ;

- une solution de jus de chou rouge à pH = 5 ;
- une solution d'hélianthine à pH = 4 ;
- les solvants utilisés pour préparer ces solutions ;
- cinq pipettes Pasteur ;
- des tubes à essais dans leur portoir.

6 Lorsqu'une espèce chimique absorbe dans plusieurs domaines de longueurs d'onde, sa couleur résulte de la synthèse additive des couleurs complémentaires des radiations absorbées.

C Recherches d'espèces colorées

7 et 8 Si le laboratoire ne dispose pas de β -carotène, il suffit, pour tracer son spectre, de l'extraire de carottes fraîches.

Pour cela, après les avoir nettoyées et épluchées, broyer le plus finement possible deux ou trois carottes coupées en dés et additionnées d'un peu d'eau avec un presse-légumes ou un mixer.

Ajouter alors 15 mL de cyclohexane, agiter vigoureusement quelques instants, laisser décanter, verser la phase liquide dans une ampoule à décanter, récupérer la phase supérieure et la filtrer afin d'obtenir une solution limpide. On peut aussi partir de jus de carottes biologique (sans additif) du commerce.

Tracer le spectre $A = f(\lambda)$ de la solution obtenue, en faisant le blanc avec du cyclohexane (le β -carotène a deux maxima d'absorption pour $\lambda_{\max} = 445$ nm et $\lambda_{\max} = 475$ nm).

Choisir un produit « solaire » dont l'étiquette annonce

qu'il contient du β -carotène, en écraser très finement plusieurs comprimés ou récupérer la poudre contenue dans les gélules, ajouter 15 mL de cyclohexane, agiter vigoureusement quelques instants, laisser décanter et filtrer la phase liquide afin d'obtenir une solution limpide.

Tracer, dans le même repère que précédemment, le spectre $A' = f(\lambda)$ de la solution obtenue, en faisant le blanc avec du cyclohexane.

Comparer les tracés obtenus et conclure.

La même étude peut être conduite avec le lycopène présent dans les tomates et dans certains produits destinés à favoriser le bronzage.

Pour cela il faudra utiliser :

- un spectrophotomètre et ses cuves ;
- un mixer ou un presse-légumes ;
- des carottes et/ou des tomates fraîches ou du jus de carottes et/ou du jus de tomate naturels ;

- 9** • Amines à deux atomes de carbone :
- éthanamine : $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{NH}_2$
 - N-méthyl-méthanamine : $\text{CH}_3 - \text{NH} - \text{CH}_3$
- Amines à trois atomes de carbone :
- propan-1-amine $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{NH}_2$
 - propan-2-amine $\text{CH}_3 - \text{CH}(\text{NH}_2) - \text{CH}_3$
 - N-méthyl-éthanamine $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{NH} - \text{CH}_3$
 - N,N-diméthyl-méthanamine ou triméthylamine $(\text{CH}_3)_3\text{N}$.

- Amines à quatre atomes de carbone :
- butan-1-amine : $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{NH}_2$
- butan-2-amine : $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH}(\text{NH}_2) - \text{CH}_3$
- 2-méthylpropan-1-amine : $(\text{CH}_3)_2\text{CH} - \text{CH}_2 - \text{NH}_2$
- 2-méthylpropan-2-amine : $(\text{CH}_3)_3\text{C} - \text{NH}_2$
- N-méthyl-propan-1-amine : $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{NH}(\text{CH}_3)$
- N-méthyl-propan-2-amine. $(\text{CH}_3)_2\text{CH} - \text{NH}(\text{CH}_3)$
- N-éthyl-éthanamine. $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{NH}(\text{CH}_2 - \text{CH}_3)$
- N,N-diméthyl-éthanamine : $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{N}(\text{CH}_3)_2$

D Amides

10 Un amide est caractérisé par le groupe $\begin{array}{c} \text{O} \\ || \\ -\text{C}-\text{N}- \\ | \end{array}$

11 Un amide est un composé de formule générale $\begin{array}{c} \text{O} \quad \text{R}' \\ || \quad | \\ \text{R}-\text{C}-\text{N}-\text{R}'' \end{array}$, où R' et R'' peuvent être des atomes d'hydrogène, des groupes alkyle, etc.

Le nom d'un amide de formule $\begin{array}{c} \text{O} \\ || \\ \text{R}-\text{C}-\text{NH}_2 \end{array}$ dérive de celui de l'alcane de même chaîne carbonée en remplaçant la terminaison **-ane** par la terminaison **-amide**. La chaîne carbonée est numérotée à partir de l'atome de carbone C. Lorsque l'atome d'azote est lié à des groupes alkyle, le nom de l'amide est précédé de la mention N-alkyl.

- 12** • Amides à deux atomes de carbone :
- éthanamide : $\text{CH}_3 - \text{CO} - \text{NH}_2$
 - N-méthyl-méthanamide : $\text{H} - \text{CO} - \text{NH}(\text{CH}_3)$

- Amides à trois atomes de carbone :
- propanamide : $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CO} - \text{NH}_2$
- N-méthyl-éthanamide : $\text{CH}_3 - \text{CO} - \text{NH} - \text{CH}_3$
- N,N-diméthyl-méthanamide : $\text{H} - \text{CO} - \text{N}(\text{CH}_3)_2$
- Amides à quatre atomes de carbone :
- butanamide : $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CO} - \text{NH}_2$
- 2-méthylpropanamide : $(\text{CH}_3)_2\text{CH} - \text{CO} - \text{NH}_2$
- N-méthyl-propanamide : $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CO} - \text{NH}(\text{CH}_3)$
- N-éthyl-éthanamide : $\text{CH}_3 - \text{CO} - \text{NH}(\text{CH}_2 - \text{CH}_3)$
- N-propyl-méthanamide : $\text{H} - \text{CO} - \text{NH}(\text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_3)$
- N-(1-méthyléthyl)-méthanamide : $\text{H} - \text{CO} - \text{NH}(\text{CH}(\text{CH}_3)_2)$
- N,N-diméthyl-éthanamide : $\text{CH}_3 - \text{CO} - \text{N}(\text{CH}_3)_2$
- N-éthyl-N-méthyl-méthanamide : $\text{H} - \text{CO} - \text{N}(\text{CH}_3)(\text{CH}_2 - \text{CH}_3)$

3 Exploitation de spectres infrarouge (IR) (p. 90-91)

Remarque : dans l'animation du livre numérique consacrée aux spectres infrarouge, les molécules étudiées sont celles de cette activité; il y a deux exemples d'application au lieu d'un.

Manuel numérique 2

Animation : Exploiter un spectre IR pour déterminer des groupes caractéristiques.

A Analyse de quelques spectres

1 Une transmittance de 100 % signifie que toute la lumière infrarouge a été transmise et que rien n'a été absorbé. Au contraire, une transmittance de 0 % signifie que rien n'a été transmis et que toute la lumière a été absorbée.

L'axe des transmittances étant gradué de 0 à 100 % de bas en haut, il est logique que les spectres IR pointent vers le bas : plus l'extremum du pic est proche de l'axe des abscisses plus l'absorption est forte.

2 En spectroscopie infrarouge, avec $\lambda = 1/\sigma$:
 $2,5 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 16,7 \mu\text{m}$, soit :
 $2500 \text{ nm} \leq \lambda \leq 16700 \text{ nm}$
 (pour le visible : $400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 800 \text{ nm}$).

3 La bande C-C ($1000 \text{ cm}^{-1} \leq \sigma \leq 1250 \text{ cm}^{-1}$) a une très faible intensité, elle est donc difficilement repérable dans un spectre.

- 4** Le groupe caractéristique est en couleur :
- pent-1-ène (B) : $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{HC} = \text{CH}_2$ groupe **alcène** ;
 - pentan-1-ol (C) : $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{OH}$ groupe **hydroxyle** ;
 - pentanal (D) : $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{HC} = \text{O}$ groupe **carbonyle** (aldéhyde) ;
 - pentan-3-one (E) : $\text{CH}_3 - \text{H}_2\text{C} - \text{CO} - \text{CH}_2 - \text{CH}_3$, groupe **carbonyle** (cétone) ;
 - acide pentanoïque (F) : $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CO}_2\text{H}$ groupe **carboxyle** ;
 - pentan-1-amine (G) : $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{NH}_2$ groupe **amine** ;
 - propanoate d'éthyle (H) : $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CO} - \text{O} - \text{CH}_2 - \text{CH}_3$ groupe **ester** ;
 - pentanamide (I) : $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CO} - \text{NH}_2$ groupe **amide**.

5 Toutes les molécules étudiées possèdent des liaisons C–H (2800-3000 cm⁻¹ et 1415-1470 cm⁻¹) et C–C (1000-1250 cm⁻¹) ; seules les autres liaisons remarquables sont mentionnées dans le tableau ci-dessous.

B Identification d'un composé

6 On repère les bandes relatives aux liaisons :
C=C ($\sigma \approx 1640 \text{ cm}^{-1}$), C_{tri}-H ($\sigma \approx 3100 \text{ cm}^{-1}$),

O–H ($\sigma \approx 3350 \text{ cm}^{-1}$) et C–O ($\sigma \approx 1100 \text{ cm}^{-1}$).
Y correspond à la molécule M, soit le pent-2-èn-2-ol.

7 Les bandes d'absorption associées à chacune des liaisons rencontrées en chimie organique (C–C, C–H, O–H, N–H, C–O, C=C, C=O, etc.) correspondent à un domaine de nombre d'ondes σ bien précis.

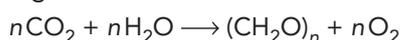
Un spectre infrarouge renseigne ainsi sur la nature des liaisons présentes dans une molécule et donc sur ses groupes caractéristiques.

Molécules	Fonction chimique	Bandes d'absorption des principales liaisons	
B	Alcène	C=C ($\sigma \approx 1640 \text{ cm}^{-1}$)	C _{tri} -H ($\sigma \approx 3100 \text{ cm}^{-1}$)
C	Alcool	O–H ($\sigma \approx 3350 \text{ cm}^{-1}$)	C–O ($\sigma \approx 1100 \text{ cm}^{-1}$)
D	Aldéhyde	C=O ($\sigma \approx 1750 \text{ cm}^{-1}$)	
E	Cétone	C=O ($\sigma \approx 1720 \text{ cm}^{-1}$)	
F	Acide carboxylique	C=O ($\sigma \approx 1710 \text{ cm}^{-1}$)	O–H ($\sigma \approx 3200 \text{ cm}^{-1}$)
G	Amine	N–H ($\sigma \approx 3250 \text{ à } 3350 \text{ cm}^{-1}$)	
H	Ester	C=O ($\sigma \approx 1730 \text{ cm}^{-1}$)	C–O ($\sigma \approx 1220 \text{ cm}^{-1}$)
I	Amide	C=O ($\sigma \approx 1620 \text{ à } 1670 \text{ cm}^{-1}$)	N–H ($\sigma \approx 3200 \text{ à } 3350 \text{ cm}^{-1}$)

4 Utilisations des spectres UV-visible et de RMN (p. 92)

1 *Monomères* : espèces chimiques dont l'enchaînement conduit à un polymère. L'éthylène (ou éthène) CH₂=CH₂, le styrène C₆H₅–CH=CH₂, le chlorure de vinyle CHCl=CH₂ sont des monomères.

Photosynthèse : synthèse de la matière végétale à partir d'eau et de dioxyde de carbone, en présence de chlorophylle sous l'action de l'énergie lumineuse. La photosynthèse est une réaction photochimique d'équation générale :



Isotopes : atomes ou ions monoatomiques dont les noyaux possèdent le même nombre de protons mais un nombre de neutrons différents : ³⁵Cl et ³⁷Cl sont isotopes.

Chaptalisé : se dit d'un vin dont le degré alcoolique a été augmenté par ajout de sucre lors de la fermentation du moût de raisin. Ce procédé a été mis au point par le chimiste français Jean CHAPTAL (1756-1832).

Métabolisme : ensemble des processus de transformations de matière et d'énergie par l'organisme.

Protéines : macromolécules naturelles constituées par l'enchaînement d'acides α -aminés naturels, reliés entre eux par des liaisons peptidiques; les enzymes sont des protéines.

Principes actifs : espèces chimiques possédant un effet thérapeutique : l'aspirine et le paracétamol sont des principes actifs.

2 Le DDL absorbe dans l'UV ($\lambda \approx 260 \text{ nm}$) mais aussi dans le visible, plus précisément dans le violet ($\lambda \approx 420 \text{ nm}$); il peut donc être jaune.

3 L'arôme d'un produit alimentaire est dû à la présence de molécules particulières; celles-ci peuvent

être naturelles ou synthétiques. Généralement, les molécules synthétiques coûtent beaucoup moins chères que celles extraites d'espèces naturelles, végétales ou animales. C'est pour cette raison que l'on cherche à identifier l'origine de ces molécules afin qu'il n'y ait pas de fraudes ou de publicités mensongères.

La détermination par RMN du rapport $R = \%(^2\text{H})/\%(^1\text{H})$ des molécules d'arômes présentes dans le produit analysé permet, grâce aux données cartographiques disponibles, de localiser dans quelles régions ont été produites les molécules constituant ce produit et de vérifier si l'espèce naturelle, source de ce produit, est cultivée dans cette région.

4 L'hydrogène, le carbone, l'azote et l'oxygène sont les principaux éléments présents dans les molécules de protéines, de glucides et de lipides, constituants essentiels de l'organisme. L'étude en RMN des résonances de ces éléments est donc essentielle en médecine.

5 L'existence de liaisons hydrogène affaiblit les liaisons covalentes O–H ou N–H; la présence de telles liaisons se traduit par une diminution du nombre d'ondes de la radiation absorbée et peut donc être détectée en infrarouge.

Le déplacement chimique d'un proton dépend de l'environnement électronique de ce proton; la présence de liaisons hydrogène modifie cet environnement et donc le déplacement chimique correspondant.

Exercices (p. 101-115)

QCM

1. 1. B et C; 2. B; 2. 1. B; 2. A et C; 3. 1. A et C; 2. A et C; 3. B et C; 4. 1. C; 2. C; 3. B et C; 4. B; 5. A.

Application immédiate

5 Associer une molécule à son spectre infrarouge

1. Le spectre IR présente une bande d'absorption vers 3400 cm^{-1} (liaison O-H) et une vers 1700 cm^{-1} (liaison C=O). B peut avoir la formule a.
2. La bande large vers 3400 cm^{-1} est caractéristique de la présence de liaisons hydrogène.

6 Relier un spectre de RMN à une molécule

Le 1,1-dichloroéthane a pour formule $\text{Cl}_2\text{CH}-\text{CH}_3$. Son spectre de RMN présente deux signaux : un doublet pour CH_3 et un quadruplet pour CH, ce qui est le cas de celui proposé.

Les hauteurs d'intégration sont telles que $h(\text{CH}_3) = 3 h(\text{CH})$, ce qui est compatible.

Les valeurs des déplacements chimiques du spectre sont supérieures à celles lues dans la table : $(\delta(\text{CH}_3-\text{C}-\text{Cl}) = 2\text{ ppm}$ au lieu de 1,5 ppm et $\delta(\text{CH}-\text{Cl}) = 6\text{ ppm}$ au lieu de 4 ppm).

Cela provient de la présence de deux atomes de chlore et non d'un seul.

Pour commencer

7 Savoir lire et exploiter un spectre UV-visible

- a. On lit l'absorbance en ordonnée et la longueur d'onde en abscisse.
b. Pour les radiations UV : $200\text{ nm} \leq \lambda \leq 400\text{ nm}$.
c. C'est un spectre d'absorption.
d. On applique la loi de Beer-Lambert.
e. Il y a absorption dans l'ultraviolet.
f. L'espèce est jaune.

8 Utiliser un spectre pour déterminer une couleur

$\lambda_{\text{max}} = 450\text{ nm}$, soit une absorption dans le domaine du violet-bleu, couleur complémentaire du jaune-orangé.

9 Justifier une couleur à partir d'un spectre

Le vert de bromocrésol absorbe dans le bleu ($\lambda = 450\text{ nm}$), couleur complémentaire du jaune, et

dans l'orangé ($\lambda = 610\text{ nm}$), couleur complémentaire du vert-bleu, d'où sa couleur à $\text{pH} = 4,6$.

10 Reconnaître un groupe caractéristique

- a. Groupes amine $-\text{NH}_2$ et carboxyle $-\text{COOH}$ (fonctions amine et acide carboxylique);
b. groupe hydroxyle $-\text{OH}$, groupes amine $-\text{NH}_2$ et carboxyle $-\text{COOH}$ (fonctions alcool, amine et acide carboxylique);
c. groupes amine $-\text{NH}_2$, carboxyle $-\text{COOH}$ et amide $-\text{CO}-\text{NH}_2$ (fonctions amine, acide carboxylique et amide);
d. groupes carbonyle $\text{C}=\text{O}$, alcène $\text{C}=\text{C}$ et carboxyle $-\text{COOH}$ (fonctions cétone, alcène et acide carboxylique);
e. groupes carbonyle $\text{C}=\text{O}$ et alcène $\text{C}=\text{C}$ (fonctions aldéhyde et alcène).

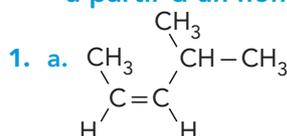
11 Nommer des composés organiques

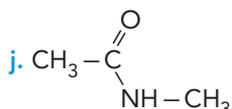
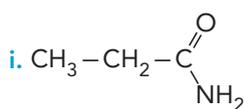
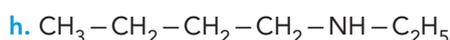
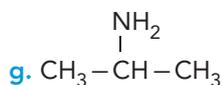
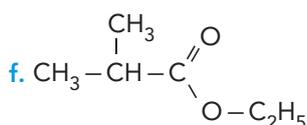
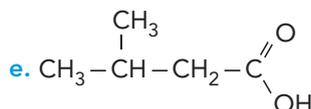
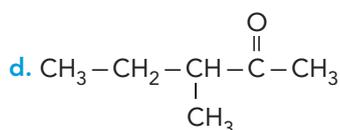
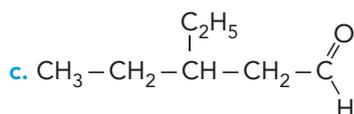
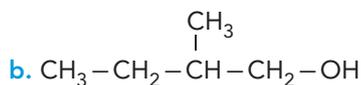
1. a. Groupe alcène $\text{C}=\text{C}$ (alcène);
b. groupe hydroxyle $-\text{OH}$ (alcool);
c. groupe amine $-\text{NH}_2$ (amine);
d. groupe carbonyle $\text{C}=\text{O}$ (cétone);
e. groupe carbonyle $\text{C}=\text{O}$ (aldéhyde);
f. groupe amine $-\text{NH}-$ (amine);
g. groupe ester $-\text{CO}-\text{O}-\text{C}$ (ester);
h. groupe amide $-\text{CO}-\text{NH}-$ (amide).
2. a. 2-méthylbut-2-ène; b. 5-méthylhexan-2-ol;
c. pentan-2-amine; d. 4-éthylhexan-2-one;
e. butanal; f. N-éthylbutan-2-amine;
g. 2-méthylbutanoate d'éthyle;
h. N-méthylbutanamide.

12 Utiliser des formules topologiques

1. a. Groupe et fonction alcène;
b. groupe hydroxyle, fonction alcool;
c. groupe carbonyle, fonction aldéhyde;
d. groupe carbonyle, fonction cétone;
e. groupe carboxyle, fonction acide carboxylique;
f. groupe et fonction ester;
g. groupe et fonction amine;
h. groupe et fonction amine;
i. groupe et fonction amide.
2. a. (E)-4-méthylpent-2-ène;
b. 2,3-diméthylpentan-2-ol; c. 3-méthylpentanal;
d. 5-éthyl-2,4-diméthylheptan-3-one;
e. acide 2-éthylpentanoïque;
f. 2-méthylbutanoate d'éthyle;
g. N-méthylpentan-2-amine;
h. N-éthyl-N-méthylbutan-1-amine;
i. N-méthyl-3-méthylhexanamide.

13 Écrire une formule semi-développée à partir d'un nom

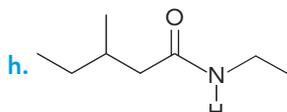
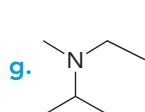
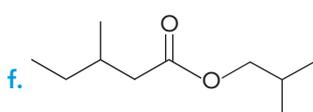
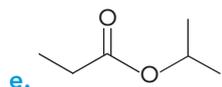
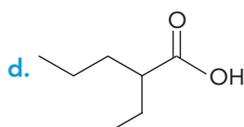
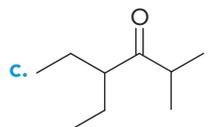
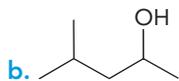
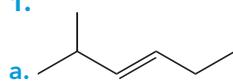




2. a. Groupe alcène (alcène);
 b. groupe hydroxyle (alcool);
 c. groupe carbonyle (aldéhyde);
 d. groupe carbonyle (cétone);
 e. groupe carboxyle (acide carboxylique);
 f. groupe ester (ester);
 g. et h. groupe amine (amine);
 i. et j. groupe amide (amide).

14 Écrire une formule topologique à partir d'un nom

1.



2. a. Groupe et fonction alcène;
 b. groupe hydroxyle, fonction alcool;
 c. groupe carbonyle, fonction cétone;
 d. groupe carboxyle, fonction acide carboxylique;
 e. groupe et fonction ester;

- f. groupe et fonction ester;
 g. groupe et fonction amine;
 h. groupe et fonction amide.

15 Savoir lire et exploiter un spectre infrarouge

a. La transmittance en ordonnée et le nombre d'ondes en abscisse.

b. Pour les spectres infrarouge :

$$600 \text{ cm}^{-1} \leq \sigma \leq 4000 \text{ cm}^{-1}.$$

- c. Un spectre infrarouge est un spectre d'absorption.
 d. Un spectre infrarouge renseigne sur la nature des liaisons présentes.

16 Reconnaître des bandes d'absorption

1. $\text{CH}_3-\overset{\text{OH}}{\text{CH}}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3$;

groupe hydroxyle (alcool).

2. (a) liaison O-H; (b) liaison C-H;
 (c) liaison C-H; (d) liaison C-O.

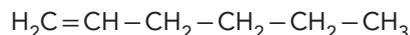
17 Utiliser un spectre pour déterminer une fonction

1. Les molécules du composé A peuvent, a priori, posséder :

- a. une liaison C-H; b. une liaison C-H;
 c. une liaison C^{tét}-C; d. une liaison C^{tri}=C.

Le composé A possède une fonction alcène

2. La formule de l'hex-1-ène est :



d'où les bandes observées.

18 Utiliser un spectre pour identifier une fonction

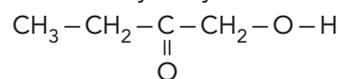
1. Les molécules du composé B peuvent, a priori, posséder :

- a. une liaison C-H; b. une liaison C-C;
 d. une liaison O^{tét}-H; e. une liaison C=O;
 f. une liaison C-O.

2. Le composé B peut, a priori, présenter :

- a. une fonction alcool; b. une fonction cétone;
 c. une fonction acide carboxylique.

3. La formule de la 1-hydroxybutanone est :



d'où les bandes observées.

19 Savoir lire et exploiter un spectre de RMN

a. Dans un spectre de RMN on lit le déplacement chimique en abscisse.

b. La courbe d'intégration permet de déterminer le nombre de protons qui résonnent.

c. La multiplicité d'un signal indique le nombre de protons équivalents voisins.

d. Une molécule qui présente un doublet et un quadruplet peut être $\text{CH}_3-\text{CHCl}_2$.

20 Lire une table de données de RMN

- a. 1,4 ppm; b. 3,0; c. 2,3; d. 3,3; e. 2,2; f. 2,0.
- a. 1,3; b. 3,6; c. 3,3; d. 1,7; e. 4,1; f. 4,3; g. 2,5.
- a. 1,5; b. 3,9; c. 1,6; d. 2,7.

21 Attribuer des déplacements chimiques

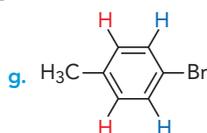
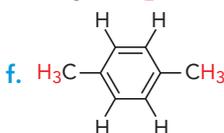
Les protons et les déplacements chimiques liés sont de même couleur.

- $\text{CH}_3\text{-CO-O-CH}_3$:
 $\delta_1 = 2,0$ ppm, $\delta_2 = 3,7$ ppm.
- $\text{CH}_3\text{-Br}$ et $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-Br}$:
 $\delta_1 = 1,7$ ppm, $\delta_2 = 2,7$ ppm.
- $\text{CH}_3\text{-O-CH}_2\text{-CH}_3$ et $\text{C}_6\text{H}_5\text{-O-CH}_2\text{-CH}_3$:
 $\delta_1 = 3,4$ ppm, $\delta_2 = 4,3$ ppm.
- $(\text{CH}_3)_2\text{CH-O-H}$ et $(\text{CH}_3)_2\text{CH-NH}_2$:
 $\delta_1 = 2,8$ ppm, $\delta_2 = 3,9$ ppm.

22 Identifier des protons équivalents

1. Les protons équivalents sont de la même couleur :

- $\text{HO-CH}_2\text{-CH}_2\text{-OH}$
- $\text{CH}_3\text{-CH(OH)-CH}_3$
- $\text{Br-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-OH}$
- $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CO-O-CO-CH}_2\text{-CH}_3$
- $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CO-O-CH}_2\text{-CH}_3$



- a. 3 signaux; d. 1 signal; g. 3 signaux;
- b. 2 signaux; e. 4 signaux; h. 4 signaux;
- c. 2 signaux; f. 3 signaux; i. 6 signaux.

23 Relier la multiplicité du signal au nombre de voisins

1. Multiplicité des signaux correspondant aux groupes méthyle CH_3 :

- $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-}$: triplet; b. $(\text{CH}_3)_3\text{C-}$: singulet;
- $(\text{CH}_3)_2\text{CH-}$: doublet.

2. Multiplicité des signaux correspondant aux groupes méthylène $\text{-CH}_2\text{-}$:

- $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$: quadruplet;
- $(\text{CH}_3)_2\text{CH-CH}_2\text{-Br}$: doublet;
- $\text{H}_2\text{N-CH}_2\text{-CH}_2\text{-NH}_2$: singulet;
- $\text{HO-CH}_2\text{-CH}_2\text{-Cl}$: triplet et triplet.

3. Multiplicité des signaux correspondant aux groupes méthyne CH- :

- $(\text{CH}_3)_2\text{CH-Cl}$: heptuplet; b. $(\text{CH}_3)_3\text{CH}$: décuplet;
- HCCl_3 : singulet; d. $(\text{CH}_3)\text{CHCl}_2$: quadruplet.

24 Reconnaître des signaux par leur multiplicité

(I) est le spectre de c (2 protons voisins de 3, et réciproquement).

(II) est le spectre de a (1 proton voisin de 6, et réciproquement).

Pour s'entraîner

25 Couleurs et radiations absorbées

1. Une solution aqueuse de chlorure de titane (III) est rouge-violacée (pourpre)

2. a. L'unique maximum se situerait vers $\lambda = 450$ nm (dans le bleu).

b. La couleur perçue est la superposition du jaune, couleur complémentaire du violet ($\lambda = 430$ nm) et de l'orange, couleur complémentaire du bleu ($\lambda = 500$ nm).

26 Spectre UV-visible et réactions chimiques

La solution de sulfate de nickel absorbe dans le violet ($\lambda = 400$ nm), couleur complémentaire du jaune-vert, et dans le rouge ($\lambda = 730$ nm), couleur complémentaire du bleu-vert; elle est donc verte.

La solution contenant le complexe absorbe dans le jaune-vert (570 nm); elle est donc violette.

27 Chimie et santé

Pour chaque molécule, les réponses sont données de gauche à droite :

a. Lidocaïne : groupe et fonction amide; groupe et fonction amine.

b. Captotril : groupe et fonction amide; groupe carboxyle, fonction acide carboxylique.

c. Misoprostol : groupe et fonction ester; groupe hydroxyle et fonction alcool; groupe carbonyle et fonction cétone.

d. Aspirine : groupe carboxyle, fonction acide carboxylique; groupe et fonction ester.

e. Bupivacaïne : groupe et fonction amine; groupe et fonction amide.

f. Péthidine : groupe et fonction amine; groupe et fonction ester.

28 Composés azotés

1. On repère des liaisons :

C-H (2900 cm^{-1} et 1400 cm^{-1}),

$\text{C}=\text{O}$ (1700 cm^{-1}),

N-H (3200 cm^{-1} et 3400 cm^{-1}).

2. a. Amides isomères du composé A :

(I) : propanamide : $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CO-NH}_2$;

(II) : N-méthyl-éthanamide : $\text{CH}_3\text{-CO-NH(CH}_3\text{)}$;

(III) : N,N-diméthyl-métanamide $\text{H-CO-N(CH}_3\text{)}_2$.

b. (III) ne peut avoir le spectre proposé, car elle ne présente pas de liaison N-H .

c. A est la propanamide, car le spectre présente deux bandes pour N-H (3200 cm^{-1} et 3400 cm^{-1}).

29 Spectres infrarouge et oxydation

1. Butan-1-ol $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-OH}$;

A : butanal : $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-C=O}$;



B : acide butanoïque : $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-C=O}$.



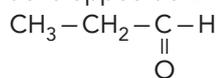
2. Butan-1-ol : fonction alcool; A : fonction aldéhyde; B : fonction acide carboxylique.

3. Les spectres de ces trois espèces présentent, entre autres, pour le butan-1-ol une bande due à O–H (3300 cm^{-1}), pour A une bande due à C=O (1720 cm^{-1}) et pour B une bande due à O–H (3100 cm^{-1}) et une due à C=O (1720 cm^{-1}).

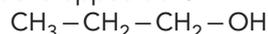
4. Le butanal est pur si son spectre IR ne présente pas de bande vers 3100 cm^{-1} - 3300 cm^{-1} .

30 Spectres infrarouge et hydrogénation

1. Formule semi-développée de B :



Formule semi-développée de C :



Fonctions chimiques :

A : alcène et aldéhyde, B : aldéhyde et C : alcool.

2. Bandes caractéristiques :

– A : bandes C=C (1650 cm^{-1}) ; C_{tri}-H (3100 cm^{-1}) ; C=O (1700 cm^{-1}) ;

– B : bande C=O (1700 cm^{-1}) ;

– C : bande O–H (3300 cm^{-1}).

3. L'hydrogénation est totale si le spectre du produit obtenu ne présente pas de bande vers :

– 1650 cm^{-1} : liaison C=C ;

– 1700 cm^{-1} : liaison C=O.

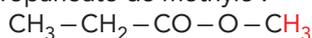
31 Spectre infrarouge d'acides carboxyliques

En phase vapeur, les molécules d'acide butanoïque ne sont pas liées et sont toutes identiques, d'où une bande très étroite. En revanche, à l'état liquide, des liaisons hydrogène relient les molécules, les liaisons O–H sont plus ou moins affaiblies, le nombre d'ondes d'absorption est alors diminué et les bandes sont plus larges.

32 Du spectre à la molécule

1. Le composé A ne peut pas être l'acide butanoïque, car il n'y a pas de signal pour $\delta \approx 11\text{ ppm}$.

2. C'est le propanoate de méthyle :



car $\delta(\text{H}) = 3,7\text{ ppm}$ dans les tables (fiche n° 11C, p. 595 du manuel) alors que $\delta(\text{H}) = 2,0\text{ ppm}$ pour $\text{CH}_3-\text{CO}-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$, ces deux groupes méthyle donnant nécessairement un signal singulet.

33 Classe d'un alcool et RMN

1. Propan-1-ol : $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$

Propan-2-ol : $\text{CH}_3-\text{CH}(\text{OH})-\text{CH}_3$

2. a. Le spectre de RMN ne présentant que trois signaux est nécessairement celui du propan-2-ol.

Il présente également un singulet (OH), un doublet (CH_3)₂ et un septuplet –CH(OH)–

b. C'est un alcool de classe secondaire.

34 À chacun son rythme

1. Propan-1-amine : $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{NH}_2$

Propan-2-amine : $\text{CH}_3-\text{CH}(\text{NH}_2)-\text{CH}_3$

N-méthyl-éthanamine : $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{NH}-\text{CH}_3$

N,N-diméthyl-méthanamine ou triméthylamine : $(\text{CH}_3)_3\text{N}$

2. Pour $\delta = 3\text{ ppm}$: un proton ; pour $\delta = 1,4\text{ ppm}$: deux protons ; pour $\delta = 0,9\text{ ppm}$: six protons.

3. Pour $\delta = 3\text{ ppm}$: septuplet donc six protons voisins ; pour $\delta = 1,4\text{ ppm}$: singulet pas de proton voisin ou proton(s) porté(s) par un hétéroatome (N, O, S, etc.) ; pour $\delta = 0,9\text{ ppm}$: doublet donc un proton voisin.

4. Seule la propan-2-amine $\text{CH}_3-\text{CH}(\text{NH}_2)-\text{CH}_3$ peut avoir ce spectre de RMN.

35 Structure et couleurs

1. Formules brutes :

a. $\text{C}_2\text{H}_6\text{N}_2$;

b. $\text{C}_7\text{H}_8\text{N}_2$;

c. $\text{C}_{12}\text{H}_{10}\text{N}_2$.

2. Plus un composé a de liaisons conjuguées, plus il absorbe des radiations de grandes longueurs d'onde, aussi :

a. doit absorber dans le violet, il est jaune ;

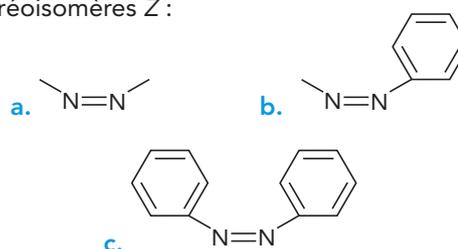
b. doit absorber dans le bleu, il est orangé ;

c. doit absorber dans le vert, il est rouge.

3. Domaines de longueurs d'onde du maximum :

a. 420-435 nm ; b. 435-480 nm ; c. 490-500 nm.

4. Stéréoisomères Z :



Pour aller plus loin

36 Vérifier une formule par RMN

1. a. Le spectre de RMN du composé A présente un signal pour $\delta \approx 7\text{ ppm}$; A peut être un dérivé du benzène.

b. Le signal à $\delta \approx 7\text{ ppm}$ est un singulet ; les protons aromatiques sont équivalents.

2. Le composé A peut être le 2-phénylpropane ou cumène, $\text{C}_6\text{H}_5-\text{CH}(\text{CH}_3)_2$ car il présente, outre le singulet à $\delta \approx 7\text{ ppm}$, un doublet à $\delta \approx 1,2\text{ ppm}$ correspondant aux deux groupes méthyle couplés avec le proton de CH, et un septuplet à $\delta \approx 2,8\text{ ppm}$ correspondant au proton du groupe méthyne CH couplé avec les six protons des groupes méthyle $(\text{CH}_3)_2$.

37 Spectroscopy analysis of amines

Traduction du texte :

« Les bandes d'absorption intéressantes des amines en infrarouge sont celles associées aux vibrations des liaisons N–H. Les alkylamines et arylamines primaires présentent deux pics dans le domaine allant de 3000 cm^{-1} à 3500 cm^{-1} ; ces pics sont dus aux modes de vibration d'élongations symétriques et antisymétriques des liaisons N–H. Ces deux vibrations sont clairement visibles à 3270 cm^{-1} et 3380 cm^{-1} dans le spectre infrarouge de la butan-1-amine, présenté dans la figure 1. Le spectre des amines secondaires telles que celui de la N-éthyl-éthanamine, proposé à la figure 2, ne présente qu'un seul pic dû à la vibration d'élongation de la liaison N–H pour 3280 cm^{-1} .

Les amines tertiaires sont bien sûr transparentes dans ce domaine puisqu'elles ne possèdent pas de liaisons N–H. »

1. Butan-1-amine : $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-NH}_2$
 N-éthyl-éthanamine : $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-NH(CH}_2\text{-CH}_3\text{)}$
 La formule d'une amine primaire est du type R-NH_2 , celle d'une amine secondaire du type RR'NH et celle d'une amine tertiaire du type RR'R''N , avec R , R' et R'' différents de H .

2. Amines primaires :

Butan-1-amine : $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-NH}_2$

Butan-2-amine : $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH(NH}_2\text{)-CH}_3$

2-méthylpropan-1-amine : $(\text{CH}_3)_2\text{CH-CH}_2\text{-NH}_2$

2-méthylpropan-2-amine : $(\text{CH}_3)_3\text{C-NH}_2$.

Amines secondaires :

N-méthyl-propan-1-amine :

$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-NH(CH}_3\text{)}$;

N-méthyl-propan-2-amine : $(\text{CH}_3)_2\text{CH-NH(CH}_3\text{)}$

N-éthyl-éthanamine : $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-NH(CH}_2\text{-CH}_3\text{)}$

Amine tertiaire :

N,N-diméthyl-éthanamine : $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-N(CH}_3\text{)}_2$

3. Les amines tertiaires sont transparentes dans le domaine allant de 3000 cm^{-1} à 3500 cm^{-1} , car, n'ayant pas de liaisons N-H , elles n'absorbent pas dans ce domaine.

4. La propanamide de formule $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CO-NH}_2$, ayant deux liaisons N-H , donne deux pics d'absorption dans le domaine allant de 3000 cm^{-1} à 3500 cm^{-1} , alors que la N-méthyl-éthanamide de formule $\text{CH}_3\text{-CO-NH(CH}_3\text{)}$, n'ayant qu'une liaison N-H , ne donne qu'un seul pic d'absorption dans ce domaine.

5. Le benzile de formule $\text{C}_6\text{H}_5\text{-CO-CO-C}_6\text{H}_5$ possède deux liaisons C=O . Celles-ci peuvent vibrer de façon symétrique et antisymétrique, d'où les deux bandes d'absorption observées pour 1662 cm^{-1} et 1677 cm^{-1} .

38 Identification d'un composé

Le composé A donne un signal vers $\delta \approx 7\text{ ppm}$, pour cinq protons. Ceux-ci peuvent être ceux d'un groupe phényle C_6H_5 -

Le doublet pour 3H vers $\delta \approx 1,4\text{ ppm}$ correspond à des protons couplés avec un atome d'hydrogène, celui-ci donnant alors un quadruplet vers $\delta \approx 4,1\text{ ppm}$. On peut envisager l'existence d'un groupe -CH-CH_3 .

Les huit atomes de carbone étant attribués, les deux protons donnant un singulet vers $\delta \approx 1,7\text{ ppm}$ peuvent être ceux d'un groupe amine -NH_2 .

La formule semi-développée de A peut être $\text{C}_6\text{H}_5\text{-CH(NH}_2\text{)-CH}_3$, soit la 1-phényléthan-1-amine.

39 Analyse élémentaire et spectres

$$1. n(\text{C}) = 136,0 \times \frac{0,706}{12} = 8;$$

$$n(\text{H}) = 136,0 \times \frac{0,059}{1} = 8;$$

$$n(\text{O}) = 136,0 \times \frac{0,235}{16} = 2,$$

soit A : $\text{C}_8\text{H}_8\text{O}_2$.

2. Vu $\delta = 12\text{ ppm}$, A peut présenter une fonction acide carboxylique -CO-OH , ce que confirme le spectre infrarouge avec une bande d'absorption vers 3500 cm^{-1} (liaison O-H) et une vers 1800 cm^{-1} (liaison C=O).

3. Les hauteurs d'intégration donnent 2, 5 et 1 protons. La multiplicité des signaux (singulet) et les valeurs de δ permettent de proposer pour A :



4. En phase vapeur, les molécules de A ne sont pas liées et sont toutes identiques, d'où une bande très étroite.

40 Éthylotest, éthylomètre

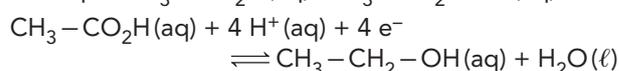
1. a. La couleur jaune-orangé des solutions d'ion $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}(\text{aq})$ résulte de la superposition du jaune complémentaire du violet ($\lambda = 430\text{ nm}$) et de l'orange couleur complémentaire du bleu ($\lambda = 500\text{ nm}$).

La couleur verte des solutions d'ions $\text{Cr}^{3+}(\text{aq})$ résulte de la superposition du jaune couleur complémentaire du violet ($\lambda = 430\text{ nm}$) et du bleu couleur complémentaire de l'orange ($\lambda = 640\text{ nm}$).

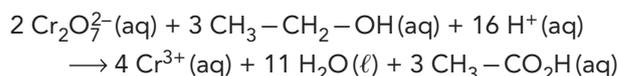
b. • Couple $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}(\text{aq})/\text{Cr}^{3+}(\text{aq})$:



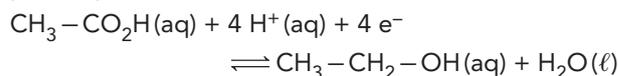
• Couple $\text{CH}_3\text{-CO}_2\text{H}(\text{aq})/\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}(\text{aq})$:



d'où :



2. L'oxydation de l'éthanol en acide éthanoïque a pour équation :



Elle met en jeu des électrons.

3. a. Les éthylomètres utilisent la loi de Beer-Lambert.

b. $\sigma_1 = 1/\lambda_1 = 2950\text{ cm}^{-1}$ et $\sigma_2 = 1/\lambda_2 = 2874\text{ cm}^{-1}$ nombres d'ondes correspondant aux liaisons C-H des groupes méthyle CH_3 et méthylène CH_2 .

c. La plupart des hydrocarbures comportent des liaisons C-H . Leur présence perturbe donc les mesures.

4. a. $\sigma_3 = 1/\lambda_3 = 1057\text{ cm}^{-1}$, correspondant à la liaison C-O .

b. L'éthanal a pour formule $\text{CH}_3\text{-C(=O)-H}$. Sa présence ne fausse donc pas la mesure.

En revanche, l'éthanoate d'éthyle de formule $\text{CH}_3\text{-C(=O)-O-CH}_2\text{-CH}_3$ présente des liaisons C-O . Sa présence perturbe donc la mesure.

5. L'air expiré contient de la vapeur d'eau H_2O . La bande d'absorption relative au groupe hydroxyle traduirait non seulement la présence du groupe hydroxyle O-H de l'éthanol, mais aussi ceux des molécules d'eau.

6. a. La précision de ces trois appareils est une précision relative; elle est définie par rapport à la valeur réelle d'alcool dans le sang telle que la déterminerait un dosage.

b. Il serait nécessaire de faire une prise de sang et de doser l'alcool effectivement présent dans le sang.

c. L'éthylomètre à infrarouge est le plus précis, c'est aussi le plus cher.

41 Identifier une molécule

A. Utilisation des spectres

1. a. Dans le spectre infrarouge, on observe une bande étroite vers 3050 cm^{-1} que l'on peut attribuer à la liaison $\text{C}_{\text{tri}}\text{-H}$, qui permet d'envisager que le composé A présente un cycle aromatique.

b. Ceci est confirmé par le spectre de RMN, car celui-ci présente un signal pour $\delta \approx 7\text{ ppm}$.

2. Une fonction alcool ($\sigma \approx 3300\text{ cm}^{-1}$) pourrait être la fonction oxygénée du composé A.

3. La courbe d'intégration du spectre de RMN permet de déterminer le nombre de protons associés à chaque signal. Ainsi de gauche à droite on trouve 5 H, 1 H, 1 H et 3 H.

L'étude des multiplicités conduit à envisager la présence d'un groupe CH-CH_3 , aussi peut-on proposer pour A : $\text{C}_6\text{H}_5\text{-CH(OH)-CH}_3$, soit le 1-phényléthanol-1-ol.

4. a. B est la 1-phényléthanone ou acétophénone $\text{C}_6\text{H}_5\text{-CO-CH}_3$.

Le spectre infrarouge de A présente une bande vers $\sigma \approx 3300\text{ cm}^{-1}$ due à la présence d'un groupe hydroxyle, alors que celui de B présenterait une bande vers $\sigma \approx 1720\text{ cm}^{-1}$ due à la présence du groupe carbonyle.

b. B ne contient pas A comme impuretés si son spectre ne présente pas de bande vers $\sigma \approx 3300\text{ cm}^{-1}$.

B. Utilisation de données spectrales

Les identifications sont faites à l'aide de la multiplicité et du déplacement des signaux.

Composé A : $\text{CH}_3\text{-CO-O-CH(CH}_3)_2$

Composé B : $(\text{CH}_3)_2\text{CH-CO-CH}_3$

Composé C : $(\text{CH}_3)_2\text{C(OH)-CO-CH}_3$

Composé D : $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CO-O-CH}_2\text{-CH}_3$

Remarque : voir erratum, p. 2.

Retour sur l'ouverture du chapitre

42 Vieillesse des œuvres d'art et spectroscopie infrarouge

1. Sens des mots ou expressions en italique :

Élastomère : polymère qui se déforme réversiblement sous l'action d'une contrainte mécanique : le caoutchouc est un élastomère.

Hydroperoxyde : composé contenant le groupe fonctionnel hydroperoxyde H-O-O-

Photo-oxydation : oxydation d'une espèce chimique sous l'action de la lumière.

Polymère : substance composée de macromolécules, c'est-à-dire des molécules de masse molaire élevée.

Ponts hydrogène : expression synonyme de liaison hydrogène. Une liaison hydrogène s'établit, par exemple, entre les doublets non liants de l'atome

d'oxygène d'un groupe carbonyle C=O et l'atome d'hydrogène d'un groupe hydroxyle -O-H .

Ozonolyse : réaction de l'ozone O_3 avec un alcène ou un dérivé éthylénique. Cette réaction conduit, après hydrolyse de l'ozonide intermédiaire formé, à la rupture de la liaison C=C avec formation, suivant le cas d'aldéhydes, de cétones ou d'acides carboxyliques.

2. La spectroscopie infrarouge suivant la loi de Beer-Lambert, plus il y a de groupes carbonyles, plus il y a de liaisons C=O et plus l'intensité de la bande d'absorption correspondante est importante.

3. La formation des hydroperoxydes se traduit par l'apparition de liaisons O-H , dont la présence se traduit en infrarouge par une bande d'absorption vers $\sigma \approx 3300\text{ cm}^{-1}$.

4. Les doublets non liants des atomes d'azote et d'oxygène sont des sites pouvant participer à des ponts hydrogène. Plus il y a de groupes carbonyle, plus il se forme de liaisons et plus la rigidité du matériau est élevée, ce qui restreint les possibilités de mouvement.

5. Dans un spectre infrarouge la réaction d'ozonolyse suivie d'une hydrolyse se traduit par :

– la disparition ou l'atténuation de la bande d'absorption de la liaison C=C ($\sigma \approx 1650\text{ cm}^{-1}$) ;

– l'apparition de la bande d'absorption de la liaison C=O ($\sigma \approx 1720\text{ cm}^{-1}$) ou l'augmentation de son intensité.

6. *Foot Soldier (Godzilla)* est une œuvre réalisée en 1991 par l'artiste japonais Kenji Yanobe. Elle représente la partie inférieure (bassin et membres inférieurs) d'un « monstre » articulé qu'il est possible de manœuvrer à partir d'un siège constituant la partie supérieure de l'œuvre. La « peau » de ce « monstre » est composée d'une mousse polyuréthane souple recouverte d'une peinture acrylique bleue mélangée à du latex.

Kenji Yanobe, né en 1965 à Osaka, est célèbre pour ses sculptures modernes, souvent cauchemardesques, représentant des monstres ou des robots. De couleurs vives, elles sont faites de plastiques, de métaux et de matériaux composites

Comprendre un énoncé

43 Identification d'espèces par spectroscopie

1. a. Composés de formule brute $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$:

(I) : $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-OH}$; (II) : $\text{CH}_3\text{-CH(OH)-CH}_3$;

(III) : $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-O-CH}_3$.

b. (I) et (II) sont des alcools :

(I) : propan-1-ol : $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-OH}$: alcool primaire ;

(II) : propan-2-ol : $\text{CH}_3\text{-CH(OH)-CH}_3$: alcool secondaire.

2. a. L'oxydation d'un alcool primaire donne un aldéhyde si l'oxydant est en défaut, et un acide carboxylique si l'oxydant est en défaut. Celle d'un alcool secondaire donne une cétone.

b. L'oxydation du propan-1-ol peut donner le propanal $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CHO}$ et l'acide propanoïque $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CO}_2\text{H}$. Celle du propan-2-ol donne de la propanone $\text{CH}_3\text{-CO-CH}_3$.

3. a. Le composé B présente des liaisons :

$\text{C}=\text{O}$ ($\sigma \approx 1720 \text{ cm}^{-1}$), $\text{C}-\text{H}$ ($\sigma \approx 2950 \text{ cm}^{-1}$),
tét

$\text{O}-\text{H}$ ($\sigma \approx 3200 \text{ cm}^{-1}$).

B est donc l'acide propanoïque

b. A est donc un alcool primaire.

c. B a pour formule $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CO}_2\text{H}$.

4. Le spectre de RMN de B est compatible avec la formule fournie, en effet avec $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CO}_2\text{H}$:

– les protons de CH_3 couplés avec les protons CH_2 donnent un triplet pour $\delta \approx 1,2 \text{ ppm}$, valeur proche de celle donnée dans les tables pour $\text{CH}_3\text{-C-}$;

– les protons de CH_2 couplés avec les protons CH_3 donnent un quadruplet pour $\delta \approx 2,4 \text{ ppm}$, valeur proche de celle donnée dans les tables pour $\text{C-CH}_2\text{-CO-O}$;

– le proton de OH , qui ne peut être couplé, donne un singulet pour $\delta \approx 11,7 \text{ ppm}$, valeur caractéristique du proton d'un groupe carboxyle.

5. A est donc le propan-1-ol, de formule $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-OH}$.

Exercices Bac

1 La lumière pour le contrôle de qualité (p. 116-117)

1. Le contrôle de qualité est l'ensemble des opérations permettant de vérifier que l'objet fabriqué possède bien les dimensions ou les performances correspondant au cahier des charges.

2. a. Le phénomène physique utilisé pour le contrôle du diamètre d'un fil est la diffraction de la lumière.

La diffraction est observée lorsqu'on éclaire des objets (fentes ou trous, par exemple) de petites dimensions. Plus le rapport $\frac{\lambda}{a}$ est grand, plus le phénomène de diffraction est important.

b. La largeur de la tache centrale est mesurée entre les centres des deux zones noires qui l'encadrent :

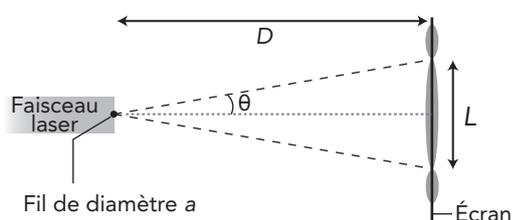


La précision de la mesure peut être améliorée en mesurant plusieurs largeurs :



En notant θ le demi-angle de diffraction, on a :

$$\tan \theta = \frac{L}{2D}$$



De plus, θ est petit, on a donc $\tan \theta \approx \theta$, avec θ en radian, d'où $\theta \approx \frac{L}{2D}$.

L'importance du phénomène de diffraction est liée à la longueur d'onde λ et à la dimension a du fil. Cela se traduit par $\theta = \frac{\lambda}{a}$.

En combinant les deux équations, on obtient :

$$a \approx \frac{2\lambda \cdot D}{L} \approx \frac{2 \times 632,8 \times 10^{-9} \times 2,345}{6,98 \times 10^{-2}} \approx 42,519 \times 10^{-6} \text{ m.}$$

L'incertitude est donnée par :

$$U(a) = \frac{632,8 \times 10^{-9} \times 2 \times 2,345}{6,98 \times 10^{-2}} \times \sqrt{\left(\frac{0,1}{632,8}\right)^2 + \left(\frac{0,002}{2,345}\right)^2 + \left(\frac{0,03}{6,98}\right)^2} = 0,186 \times 10^{-6} \text{ m.}$$

On a donc $a = (42,52 \pm 0,19) \times 10^{-6} \text{ m.}$

3. a. Des sources sont cohérentes si elles émettent des ondes de même fréquence et de déphasage constant.

b. Les faisceaux lumineux issus des deux images holographiques sont cohérents, car ils sont issus du même faisceau laser. Ils permettent d'observer une figure d'interférences stable dans le temps.

c. Les zones noires correspondent à des interférences destructives entre les ondes lumineuses issues de chacune des images. Elles témoignent de différences entre les deux états du haut-parleur : lorsqu'il a fonctionné, le haut-parleur a vibré, ces vibrations l'ont déformé.

4. a. Le phénomène utilisé pour vérifier la planéité d'un miroir plan est le phénomène d'interférences.

b. La lame de verre et le miroir étant inclinés l'un par rapport à l'autre, les rayons qui interfèrent (par exemple, R et R' sur le document 3a, p. 117 du manuel) parcourent des distances différentes. Lorsque la différence de marche augmente (ou diminue), les interférences sont alternativement destructives et constructives. Cela se produit régulièrement depuis la ligne de contact entre la lame de verre et le miroir. On observe donc des franges alternativement sombres (interférences destructives) et claires (interférences constructives).

c. On observe des interférences destructives quand la différence de marche est de :

$$k \cdot \lambda + \frac{\lambda}{2} = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

avec k un entier et des interférences constructives lorsque la différence de marche est de $k \cdot \lambda$.

d. Si le miroir n'est pas parfaitement plan, les franges ne seront ni parfaitement rectilignes ni équidistantes.

2 Identification spectrale de molécules organiques (p. 118-119)

1. a. **A** et **B** ont la même formule brute, $C_8H_{10}O$; ce sont des isomères.

b. **B** est un alcool, car le groupe hydroxyle est lié à un carbone tétragonal et non trigonal comme celui de l'espèce **A**.

c. Groupes caractéristiques et fonctions des composés :
 – **C** : groupe carbonyle, fonction aldéhyde ;
 – **D** : groupe carboxyle, fonction acide carboxylique ;
 – **E** : groupe ester, fonction ester.

2. a. Bandes d'absorption :

a : liaison $O-H$; b : liaison $C_{\text{tri}}-H_{\text{aromat}}$;

c : liaison $C_{\text{tét}}-H$; d : liaison $C_{\text{tét}}-H$;

g : liaison $O-H$; h : liaison $C_{\text{tri}}-H_{\text{aromat}}$;

i : liaison $C_{\text{tét}}-H$; j : liaison $C_{\text{tét}}-H$.

b. Le signal **a** est fin et se situe vers 3600 cm^{-1} . C'est celui d'une liaison $O-H$ pour un alcool dilué dans le tétrachlorométhane, c'est-à-dire ne présentant pas de liaison hydrogène ($O-H_{\text{libre}}$).

Le signal **g** est large et se situe vers 3300 cm^{-1} . C'est celui d'une liaison $O-H$ pour un alcool à l'état liquide, c'est-à-dire présentant des liaisons hydrogène ($O-H_{\text{lié}}$).

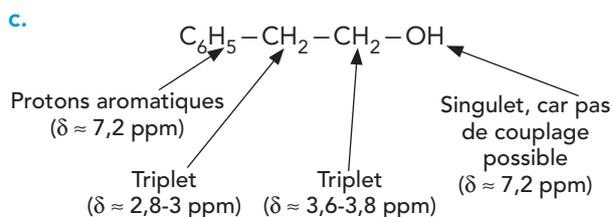
3. a. Les bandes d'absorption caractéristiques des constituants majoritaires du vin sont les bandes $O-H$ (eau et éthanol) et $C_{\text{tét}}-H$ (éthanol).

b. Le spectre infrarouge de ce vin ne permettrait pas de vérifier la présence des composés **A** et **B** dans un vin, car les bandes d'absorption des constituants majoritaires sont aussi les bandes d'absorption des composés **A** et **B**.

La spectroscopie infrarouge suit la loi de Beer-Lambert. Vu l'intensité des bandes $O-H$ et $C_{\text{tét}}-H$ des espèces majoritaires, l'intensité des bandes $C_{\text{tri}}-H_{\text{aromat}}$ serait très faible et inutilisable.

4. a. Le spectre de RMN du document 3 est celui du composé **B**, car les deux triplets présents correspondent aux deux groupes méthylène $-CH_2-CH_2-$, alors que le spectre du document 4 est celui du composé **A**, car le triplet et le quadruplet présents authentifient la présence du radical éthyle CH_3-CH_2- .

b. Formule semi-développée de **B** :
 $C_6H_5-CH_2-CH_2-OH$



5. a. L'oxydation du composé **B** à l'aide d'un oxydant en défaut donne le phényléthanal **C**.

b. Le produit obtenu sera pur s'il ne présente pas de bande $O-H$ (vers 3300 cm^{-1} - 3600 cm^{-1}) qui traduirait soit des restes d'alcool **B** (oxydation incomplète), soit des traces d'acide **D** (oxydation excessive).

6. a. L'oxydation du composé **B**, à l'aide d'un oxydant introduit en excès, donne l'acide phényléthanoïque **D**.

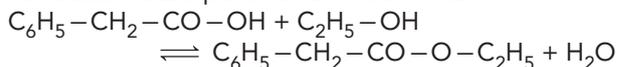
b. Un spectre infrarouge de **C** mettrait en évidence, entre autres, une bande $O-H$, que l'on peut aussi observer dans le spectre de l'alcool **B**, et une bande $C=O$, également présente dans le spectre de l'aldéhyde **C**.

Dans le spectre de RMN de **D**, on verra le signal (singulet) du proton du groupe carboxyle $-CO-OH$ pour $\delta \approx 11\text{ ppm}$.

Si le produit obtenu contient encore de l'aldéhyde **C**, on aura aussi un signal (triplet) pour $-CO-H$ pour $\delta \approx 9,9\text{ ppm}$.

Si le produit contient encore de l'alcool **B**, le spectre de RMN présentera un signal (singulet) pour $-CH_2-OH$ pour $\delta \approx 0,5-5\text{ ppm}$.

7. a. **G** est l'eau H_2O , d'où l'équation de la réaction conduisant à **E** à partir de **D** et de l'éthanol :



b. La spectroscopie de RMN paraît la technique spectroscopique la plus indiquée pour vérifier la pureté du produit et les fonctions présentes dans l'impureté. En effet, il sera facile de vérifier, dans le spectre de RMN, l'absence des signaux relatifs aux protons du groupe carboxyle $-CO-OH$ et du groupe hydroxyle $-OH$.

Ce spectre présentera deux singulets, l'un intégrant pour $5H(C_6H_5-)$, l'autre pour $2H(-CH_2-)$, un triplet pour $3H(CH_3-)$ et un quadruplet pour $2H(-CH_2-)$.

1 L'échographie : comment ça « marche » ? (p. 120-121)

1. Les documents 2 et 3 montrent que l'amplitude des ultrasons réfléchis dépend de la nature des milieux qui encadrent la surface sur laquelle se produit la réflexion.

Pour un matériau placé dans l'air, l'amplitude des ultrasons réfléchis doit donc dépendre de la nature du matériau sur lequel se produit la réflexion.

2. a. Pour déterminer la fréquence des ultrasons émis, on doit réaliser un montage permettant de visualiser les signaux correspondants. Pour cela, il faut émettre des ultrasons et relier un récepteur d'ultrasons à un oscilloscope (ou un système d'acquisition informatisé). Avec l'oscilloscope (ou le système informatisé), on peut déterminer la période des ultrasons, puis calculer leur fréquence.

La fréquence doit être supérieure à 20 kHz pour que ce soient des ultrasons.

b. Pour déterminer la longueur d'onde, il faut observer simultanément le signal issu de l'émetteur et celui issu du récepteur.

On positionne le récepteur de façon à ce que les signaux soient en phase. Ensuite, on éloigne lentement le récepteur de l'émetteur, en le déplaçant

suivant la droite qui les joint, jusqu'à ce que les signaux soient de nouveau en phase. La distance dont on a éloigné le récepteur est égale à la longueur d'onde.

Pour augmenter la précision, on éloigne d'au moins 10 longueurs d'onde (distance correspondant à la dixième position pour laquelle les signaux sont de nouveau en phase).

c. La valeur de la vitesse v de propagation se déduit de la fréquence f et de la longueur d'onde λ :

$$v = \lambda \cdot f,$$

avec λ en m et f en Hz, v est en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. a. Pour vérifier que l'amplitude des ultrasons réfléchis dépend de la nature du matériau sur lequel se produit la réflexion, on positionne le récepteur et l'émetteur côte à côte et on place en face d'eux différents matériaux, toujours à la même distance et orientés de façon identique.

Pour une même amplitude des ultrasons émis, on mesure tour à tour l'amplitude des ultrasons reçus après réflexion sur chacun des matériaux étudiés.

b. Les observations montrent que l'amplitude des ultrasons réfléchis dépend de la nature du matériau sur lequel se produit la réflexion.

2 Interpréter la couleur d'une solution (p. 122-123)

1. Le facteur de dilution est égal à $F = \frac{C_0}{C_1} = 5$.

Il suffit de prélever, avec une pipette jaugée de 10,0 mL munie d'un pipeteur ou d'une propipette, un volume $V = 10,0$ mL de solution mère et de l'introduire dans la fiole jaugée de 50,0 mL, puis de compléter jusqu'au trait et d'homogénéiser (voir fiche n° 9, p. 592 du manuel).

2. a. Le graphe présente deux maxima d'absorption pour $\lambda_1 = 425$ nm et $\lambda_2 = 620$ nm.

b. La solution étant verte, le maximum d'absorption, si le spectre n'en présentait qu'un, devrait se trouver dans le rouge, c'est-à-dire vers $\lambda \approx 700$ -800 nm.

c. La solution absorbe dans le violet ($\lambda_1 = 425$ nm), couleur complémentaire du jaune, et dans l'orange ($\lambda_2 = 620$ nm), couleur complémentaire du bleu. L'œil reçoit des radiations bleues et jaunes dont la superposition donne le vert.

d. Le vert malachite est coloré en raison de la présence d'un grand nombre de liaisons conjuguées.

Activités

1 Émilie DU CHÂTELET, une femme passionnée de sciences (p. 130)

1 Les scientifiques cités dans le texte sont LEIBNIZ, CLAIRAUT, MAUPERTUIS, KÖNIG, BERNOULLI, EULER et BUFFON.

Gottfried Wilhelm LEIBNIZ (1646-1716) est un philosophe, scientifique, mathématicien, diplomate, juriste et bibliothécaire allemand. Il est l'inventeur du calcul différentiel.

Alexis Claude CLAIRAUT (1713-1765) est un mathématicien français qui a participé, avec Pierre Louis MOREAU DE MAUPERTUIS, à une expédition en Laponie dont l'objet était d'estimer la longueur d'un degré de méridien terrestre. Il s'est illustré en géométrie et en mécanique.

Pierre Louis MOREAU DE MAUPERTUIS (1698-1759) est un philosophe, mathématicien, physicien, astronome et naturaliste français. Il a énoncé le principe de moindre action.

Johann Samuel KÖNIG (1712-1757) est un mathématicien allemand. Il s'est illustré en géométrie.

Daniel BERNOULLI (1700-1782) est un médecin, physicien et mathématicien suisse. Il s'est intéressé à l'hydrodynamique et à la conservation de l'énergie dans les fluides.

Leonhard Paul EULER (1707-1783) est un mathématicien et physicien suisse qui s'est illustré dans le calcul infinitésimal et la théorie des graphes.

Georges-Louis LECLERC, comte de BUFFON (1707-1788) est un naturaliste, mathématicien, biologiste et écrivain français. Il a participé notamment à l'*Encyclopédie* en se chargeant des sciences de la nature. BUFFON est surtout célèbre pour son œuvre majeure en 36 volumes (*Histoire naturelle, générale et particulière*) dans laquelle est rassemblé tout le savoir de son époque dans le domaine des sciences naturelles. Il y évoque également la possibilité d'une généalogie commune entre l'homme et le singe.

2 L'expression « de lui-même » signifie exclusivement livré à lui-même, sans interaction avec l'extérieur. Cette loi a été vue en 2^{de} sous le nom de « Principe d'inertie », également appelé « Première loi de Newton ».

3 a. Le mouvement d'un système varie si sa trajectoire est modifiée ou si la valeur de sa vitesse change. Cette variation a lieu sous l'effet d'une ou plusieurs forces.

b. Si la vitesse d'un système varie en valeur ou en direction, sa quantité de mouvement varie de la même façon puisque $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$.

c. Dans la traduction d'Émilie DU CHÂTELET, il est dit que « le changement qui arrive dans le mouvement » est proportionnel à \vec{F} .

Comme actuellement on traduit la deuxième loi de Newton par $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$, on peut donc déduire que $\frac{d\vec{p}}{dt}$ ou un vecteur qui lui est proportionnel modélise « le changement qui arrive dans le mouvement ». La résultante des forces appliquées au système représente la force motrice.

4 La troisième loi de Newton se nomme « principe d'interaction ».

Exemples d'interaction :

– l'interaction gravitationnelle entre la Terre et la Lune. Cette interaction est modélisée par deux forces, la force exercée par la Terre sur la Lune et la force exercée par la Lune sur la Terre. Ces deux forces sont opposées;

– l'interaction électromagnétique entre deux corps chargés. Elle peut être attractive pour des charges de signes opposés ou répulsive pour des charges de même signe;

– il existe également les interactions forte et faible au niveau d'un noyau.

5 Première loi de Newton : Un système sans interaction avec l'extérieur reste immobile ou en mouvement rectiligne uniforme.

Deuxième loi de Newton : $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$.

Troisième loi de Newton : Si un système A exerce sur un système B une force $\vec{F}_{A/B}$, alors le système B exerce sur le système A une force $\vec{F}_{B/A}$.

Ces deux forces ont même direction, même valeur et sont de sens opposés. On peut le résumer par :

$$\vec{F}_{A/B} = -\vec{F}_{B/A}$$

2 Étude de mouvements rectilignes (p. 131)

1 Les enregistrements sont réalisés dans un référentiel terrestre.

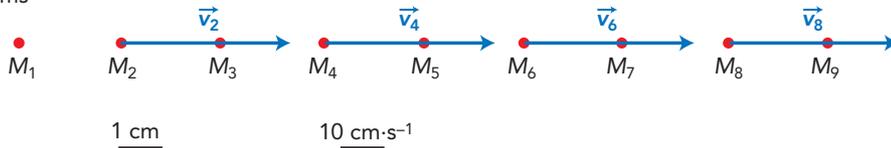
2 Le mobile abandonné avec une vitesse initiale est animé d'un mouvement rectiligne. La valeur de sa vitesse est constante, car la distance séparant deux positions successives, pour un même intervalle de

temps, est la même. Le mouvement est donc rectiligne uniforme.

Le mobile soumis à une force constante est animé d'un mouvement rectiligne accéléré. La distance séparant deux positions successives du mobile, pour un même intervalle de temps, augmente.

3 a. Enregistrement 1 : mobile abandonné avec une vitesse initiale

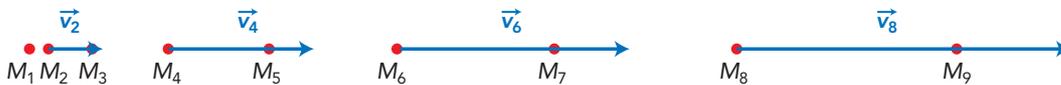
$$\Delta t = 60 \text{ ms}$$



$$v_2 = \frac{4,5}{2 \times 0,060} = 38 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Avec une échelle de 1 cm pour 10 cm·s⁻¹, la longueur du segment fléché est de 3,8 cm. Il en est de même pour les autres vitesses.

Enregistrement 2 : mobile soumis à une force constante



$$\Delta t = 60 \text{ ms} \quad \underline{1 \text{ cm}} \quad \underline{10 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}} \quad \underline{1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}$$

$$v_2 = \frac{1,0}{2 \times 0,060} = 8,3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}; \quad v_4 = \frac{3,0}{2 \times 0,060} = 25 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1};$$

$$v_6 = \frac{5,0}{2 \times 0,060} = 42 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}; \quad v_8 = \frac{7,1}{2 \times 0,060} = 59 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}.$$

b. La vitesse garde une valeur constante dans le cas du mobile abandonné avec une vitesse initiale. La valeur de la vitesse augmente dans le cas du mobile soumis à une force constante.

4 a. Les vecteurs accélérations sont représentés sur le schéma ci-dessous :

$$\Delta t = 60 \text{ ms} \quad \underline{1 \text{ cm}} \quad \underline{10 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}} \quad \underline{1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}$$



$$a_3 = \frac{25 - 8,3}{2 \times 0,060} = 139 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2} = 1,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}; \quad a_5 = \frac{42 - 25}{2 \times 0,060} = 142 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2} = 1,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2};$$

$$a_7 = \frac{59 - 42}{2 \times 0,060} = 144 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2} = 1,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

b. La valeur de l'accélération est nulle dans le cas du mobile abandonné avec une vitesse initiale et constante pour le mobile soumis à une force constante.

5 La première loi de Newton est illustrée par la première expérience, car le point matériel est animé d'un mouvement rectiligne uniforme.

6 Dans le premier enregistrement, le mobile est animé d'un mouvement rectiligne uniforme, il est donc soumis à des forces qui se compensent. La résultante des forces est égale au vecteur nul dans ce cas.

Dans le second enregistrement, la résultante des forces appliquées au mobile est proportionnelle à l'accélération à chaque instant; elle a même direction et même sens que l'accélération.

7 Dans le cas d'un mouvement rectiligne uniforme, le vecteur accélération est égal au vecteur nul.

Dans le cas d'un mouvement rectiligne uniformément accéléré, le vecteur accélération est constant, dans le sens du mouvement.

8 Dans un premier temps, il faut tracer deux vecteurs vitesse aux dates t_i et t_{i+2} , puis, ensuite, le vecteur accélération à la date t_{i+1} . On repère, grâce à la longueur du segment fléché de ce dernier et l'échelle du schéma, la valeur de l'accélération. Pour obtenir la valeur de la résultante des forces à cette date, il faut multiplier la valeur de l'accélération par la masse du système.

3 Étude de mouvements circulaires (p. 132-133)

A Étude expérimentale

Complément

Les éphémérides ont été obtenues à partir du site de l'Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides (IMCCE) : http://www.imcce.fr/fr/ephemerides/formulaire/form_ephepos.php
 Pour l'impression du graphique avec Microsoft Excel® ou Open-Calc®, attention de ne pas sélectionner le graphique qui s'imprime alors en pleine page format A4. Le repère n'est plus orthonormé.
 Il est possible de télécharger sur le site www.hachette-education.fr dans le dossier « Livre du professeur : compléments » le fichier tableur vierge (Chap5_act3_Venus_vierge.xls), le corrigé (Chap5_act3_Venus_corrige.xls) et un tracé de la trajectoire du centre de Vénus dans un repère orthonormé (Chap5_act3_Venus_graphe.xls).

1 La distance R entre les centres du Soleil et de Vénus peut être calculée dans le tableur :

$$R = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Pour chaque point de la trajectoire, on obtient :

$$R = 1,08 \times 10^{11} \text{ m.}$$

Cette distance est constante.

La trajectoire de Vénus autour du Soleil est circulaire et centrée sur ce dernier.

2 La valeur de la vitesse du centre C de Vénus est sensiblement constante :

$$v = 3,46 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Son mouvement peut donc être considéré comme uniforme.

3 La valeur de l'accélération de C , calculée dans le tableur, est égale à :

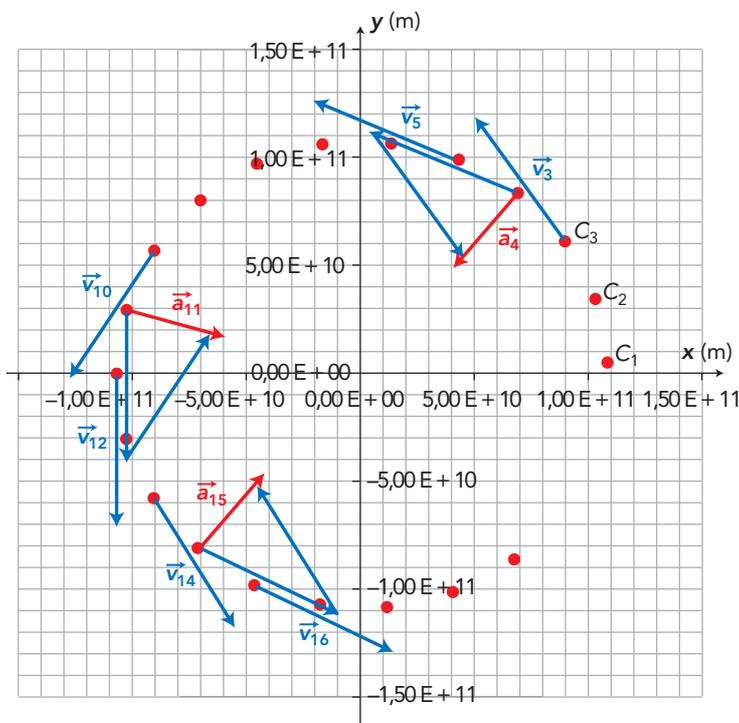
$$a = 1,11 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

$$\frac{v^2}{R} = \frac{(3,46 \times 10^4)^2}{1,08 \times 10^{11}} = 1,11 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

Ces deux valeurs sont égales, donc :

$$a = \frac{v^2}{R}$$

► Constructions des vecteurs vitesses et accélérations :



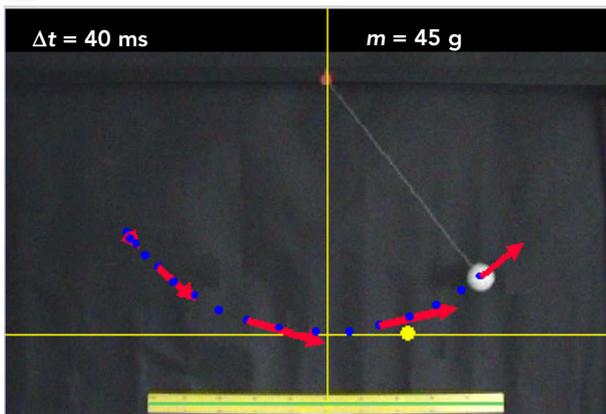
4 Les vecteurs accélérations sont dirigés vers le centre de la trajectoire circulaire, c'est-à-dire le centre S du Soleil.

5 Dans le cas d'un mouvement circulaire de rayon R et uniforme, le vecteur accélération est centripète. Sa valeur constante est égale à :

$$a = \frac{v^2}{R}$$

B L'accélération d'un pendule simple

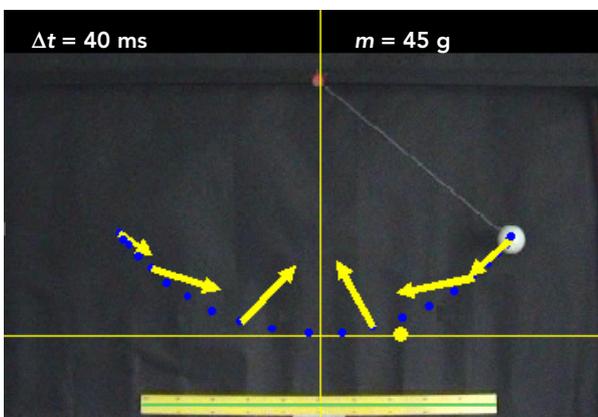
6 a. Évolution du vecteur vitesse :



Le vecteur vitesse varie au cours du mouvement.

b. Le mouvement est circulaire non uniforme.

7 a. Les vecteurs accélérations n'ont pas une direction fixe.



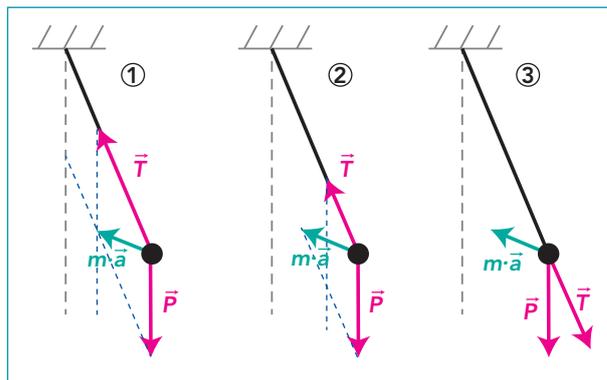
b. La valeur de l'accélération change aussi au cours du mouvement.

8 À l'aide d'un tableur, on calcule v_x , v_y , puis v et enfin $\frac{v^2}{L}$.

Ensuite, on calcule a_x , a_y , puis a . On observe alors, pour différentes dates, que a est différent de $\frac{v^2}{L}$.

9 L'objet est soumis à son poids \vec{P} (vertical vers le bas) et à l'action \vec{T} du fil (dirigée selon la direction du fil, vers son autre extrémité fixe).

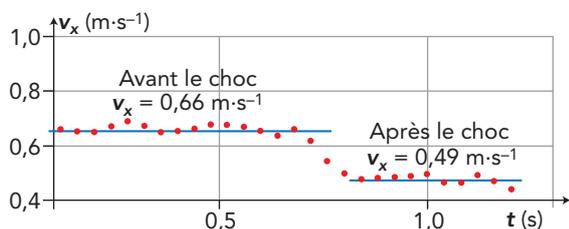
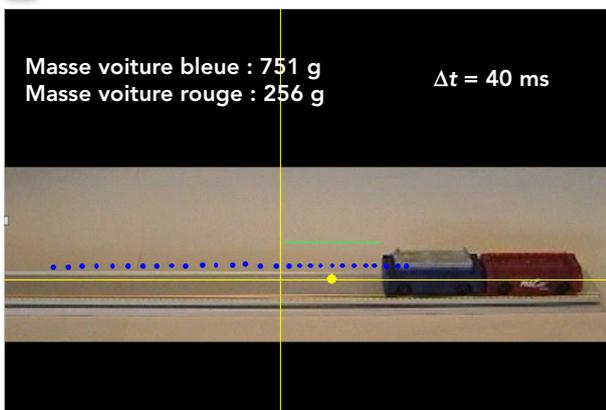
10 La résultante des forces exercées sur le pendule doit être égale à $m \cdot \vec{a}$; seul le schéma ① convient. On peut le vérifier par la technique du parallélogramme comme illustré sur les schémas ① et ②.



11 Dans un mouvement circulaire non uniforme, l'accélération n'est ni constante, ni centripète.

4 Propulsion et quantité de mouvement (p. 134)

1 a.



La valeur de la quantité de mouvement du chariot initialement à l'arrêt est nulle, celle du chariot mobile est égale à :

$$0,751 \times 0,66 = 0,50 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

La valeur de la quantité de mouvement du système constitué par les deux chariots avant le choc est donc égale à $0,50 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Après le choc, la quantité de mouvement du système constitué par les deux chariots mobiles vaut :

$$(0,751 + 0,256) \times 0,49 = 0,49 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

b. La quantité de mouvement se conserve au cours d'un choc.

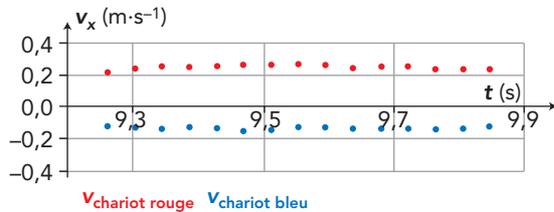
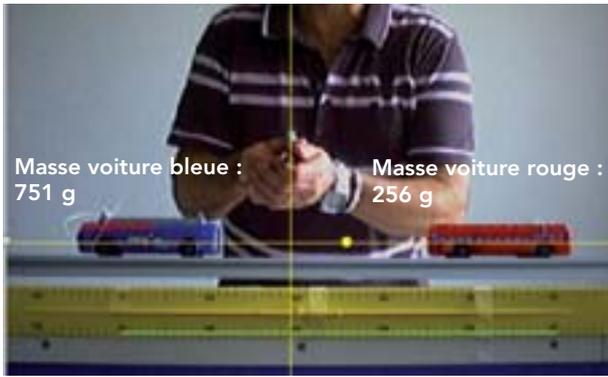
2 a. La quantité de mouvement des chariots initialement à l'arrêt est nulle.

Après la rupture du fil, les deux chariots mobiles ont des quantités de mouvement opposées.

Les valeurs des vitesses horizontales sont obtenues par l'exploitation d'une vidéo.

On obtient :

$$v_{\text{chariot rouge}} = 0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \text{ et } v_{\text{chariot bleu}} = 0,13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$



Les valeurs des quantités de mouvement après la coupure du fil sont égales :

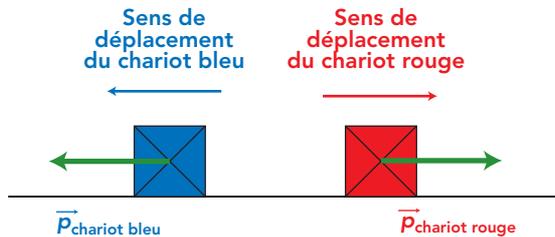
– pour le chariot rouge :

$$P_{\text{chariot rouge}} = m_{\text{chariot rouge}} \cdot v_{\text{chariot rouge}} = 0,256 \times 0,25 = 0,064 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1};$$

– pour le chariot bleu :

$$P_{\text{chariot bleu}} = m_{\text{chariot bleu}} \cdot v_{\text{chariot bleu}} = 0,501 \times 0,13 = 0,065 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

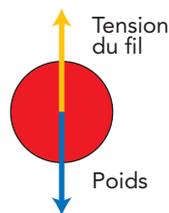
b. Schéma des quantités de mouvement de chacun des mobiles après la coupure du fil :



5 Galiléen or not galiléen ? (p. 135)

1 Une translation est le déplacement d'un objet tel que tout segment reliant deux points quelconques de cet objet garde la même direction.

2 a. Lorsque la voiture ne roule pas, la boule est soumise à son poids et à l'action du fil auquel elle est suspendue. Ces deux forces sont opposées (voir schéma ci-contre).



b. Lorsque la voiture roule à vitesse constante sur une route rectiligne horizontale, la boule est soumise à ces deux mêmes forces opposées. On obtient le même schéma que pour la réponse 2a.

c. Dans ces deux situations, la voiture est un référentiel galiléen puisque le principe d'inertie est vérifié : la résultante des forces est nulle, la boule reste immobile.

3 a. Lorsque la voiture freine brusquement, les actions auxquelles la boule est soumise restent les mêmes.

c. Les deux quantités de mouvement ont la même direction, des sens opposés et des valeurs égales. La quantité de mouvement de l'ensemble est donc toujours nulle.

La quantité de mouvement du système constitué par les deux chariots mobiles se conserve.

3 a. La quantité de mouvement du système initialement à l'arrêt est nulle.

b. Lorsque l'air commence à s'échapper, la valeur de la quantité de mouvement du système, constitué du mobile et du ballon qui n'est plus que partiellement rempli d'air, augmente. Elle est opposée à celle de l'air qui s'échappe, si l'on considère que la quantité de mouvement se conserve.

c. La masse de l'air qui s'échappe est plus faible que celle du mobile.

Comme les quantités de mouvement $p = m \cdot v$ ont la même valeur, les vitesses sont différentes; celle du corps le plus lourd doit être plus faible que celle du plus léger.

La valeur de la vitesse de l'air est donc plus grande que celle du mobile.

4 La propulsion par réaction s'explique par la conservation de la quantité de mouvement d'un système et du fluide qu'il éjecte. Le système éjecte un fluide avec une vitesse importante. La conservation de la quantité de mouvement implique que le système se mettra en mouvement dans le sens opposé à celui du fluide éjecté.

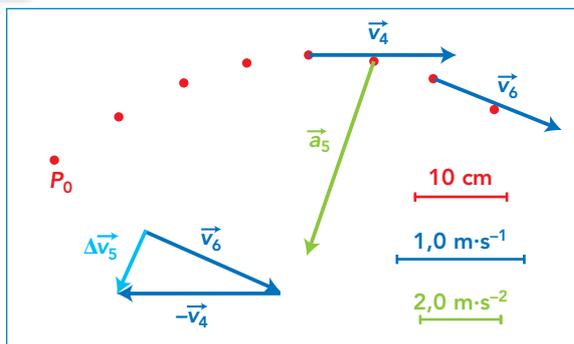
Exercices (p. 143-153)

QCM

- 1** 1. A; 2. B; 3. A; **2** 1. B; 2. B et C; 3. C; 4. C;
3 1. B et C; 2. C; 3. C.

Application immédiate

4 Tracer des vecteurs vitesse et accélération



$$\tau = 60 \text{ ms}; v_6 = \frac{P_5 P_7}{2\tau}$$

En tenant compte de l'échelle des longueurs :

$$P_5 P_7 = 14 \text{ cm} = 1,4 \times 10^{-1} \text{ m.}$$

$$\text{Donc : } v_6 = \frac{1,4 \times 10^{-1}}{2 \times 60 \times 10^{-3}} = 1,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$\text{De même : } v_4 = \frac{P_3 P_5}{2\tau} = 1,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Voir les constructions des vecteurs sur le schéma ci-dessus.

La longueur du vecteur Δv_5 représente $0,64 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

La valeur du vecteur accélération est :

$$a_5 = \frac{\Delta v_5}{2\tau} = \frac{0,64}{2 \times 60 \times 10^{-3}} = 5,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

5 Déterminer une accélération

Voir la correction de l'exercice 24, p. 50.

Pour commencer

6 Choisir un référentiel d'étude (1)

- a., b., e. Référentiel terrestre.
 c. Référentiel géocentrique.
 d. Référentiel héliocentrique.

7 Choisir un référentiel d'étude (2)

- a. Système {Terre} : référentiel héliocentrique.
 b. Système {satellite} : référentiel géocentrique.
 c. Système {cycliste} : référentiel terrestre.
 d. Système {Io} : référentiel lié au centre de Jupiter.

8 Déterminer des vecteurs positions et des vecteurs vitesses

1. $\overrightarrow{OG_1}$ a pour coordonnées $\begin{pmatrix} 5 \text{ m} \\ 15 \text{ m} \end{pmatrix}$;

$\overrightarrow{OG_2}$ a pour coordonnées $\begin{pmatrix} 10 \text{ m} \\ 20 \text{ m} \end{pmatrix}$;

$\overrightarrow{OG_3}$ a pour coordonnées $\begin{pmatrix} 22 \text{ m} \\ 20 \text{ m} \end{pmatrix}$.

2. $OG_1 = \sqrt{5^2 + 15^2} = 16 \text{ m}$;

$OG_2 = \sqrt{10^2 + 20^2} = 22 \text{ m}$;

$OG_3 = \sqrt{22^2 + 20^2} = 30 \text{ m}$.

3. $\vec{v}_2 = \frac{\overrightarrow{G_1 G_3}}{2\tau}$;

comme $\overrightarrow{G_1 G_3}$ a pour coordonnées $\begin{pmatrix} 17 \text{ m} \\ 5 \text{ m} \end{pmatrix}$

alors \vec{v}_2 a pour coordonnées $\begin{pmatrix} 17 \\ 2 \times 0,8 \\ 5,0 \\ 2 \times 0,8 \end{pmatrix}$

soit $\begin{pmatrix} 11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \\ 3,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \end{pmatrix}$.

La valeur de \vec{v}_2 est : $v_2 = \sqrt{11^2 + 3,1^2} = 11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

9 Connaître les propriétés du vecteur vitesse

- a. Incorrect : le mouvement est rectiligne uniforme. Les vecteurs \vec{v}_1 et \vec{v}_4 doivent être colinéaires, de même sens et de même longueur.
 b. Incorrect : le vecteur vitesse n'est pas dans le bon sens.
 c. Incorrect : le vecteur n'est pas tangent à la trajectoire au point considéré.
 d. Incorrect : le mouvement est uniforme. Les vecteurs vitesses doivent avoir la même longueur.
 e. Correct.

10 Connaître les propriétés du vecteur accélération

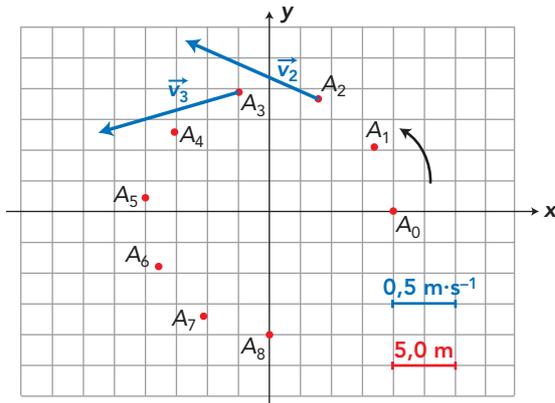
- a. Le mouvement est rectiligne uniforme. Le vecteur accélération est un vecteur nul.
 b. Le mouvement est accéléré. Le vecteur accélération est colinéaire à l'axe et dans le sens du mouvement (vers la droite).
 c. Le mouvement est décéléré. Le vecteur accélération est colinéaire à l'axe et de sens opposé à celui du mouvement (vers la gauche).

11 Représenter des vecteurs vitesses

1. $v_2 = \frac{A_1 A_3}{2\Delta t} = \frac{11,4}{2 \times 5,0} = 1,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;

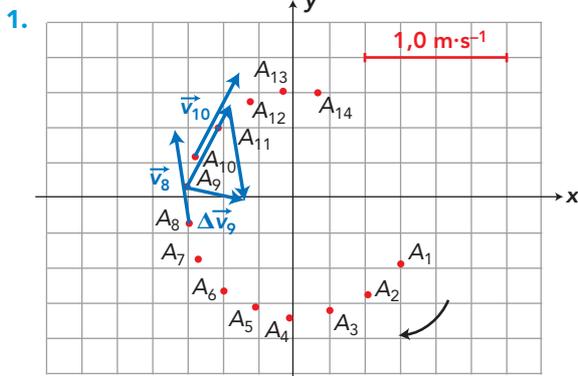
$v_3 = \frac{A_2 A_4}{2\Delta t} = \frac{11,4}{2 \times 5,0} = 1,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

En utilisant l'échelle 2 carreaux $\rightarrow 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, on peut représenter \vec{v}_2 et \vec{v}_3 .



2. Le mouvement est circulaire uniforme.

12 Représenter des vecteurs accélérations



2. En tenant compte de l'échelle des vitesses :
 $\Delta v_9 = 0,41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

La norme du vecteur accélération au point A_9 a pour expression :

$$a_9 = \frac{\Delta v_9}{2\Delta t} = \frac{0,41}{2 \times 0,50} = 0,41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

3. Le vecteur accélération \vec{a}_9 a même direction et même sens que le vecteur $\Delta\vec{v}_9$.

Il a pour valeur $a_9 = 0,41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

13 Définir et calculer une quantité de mouvement

1. Le vecteur quantité de mouvement \vec{p} d'une bille de paintball de masse m se déplaçant à la vitesse \vec{v} est défini par $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$.

Sa valeur p s'exprime en $\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ si la masse est en kg et la vitesse en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

2. $p = 0,0035 \times 75 = 0,2625 \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

3. a. $\frac{U(p)}{p} = \sqrt{\left(\frac{U(m)}{m}\right)^2 + \left(\frac{U(v)}{v}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0,1}{3,5}\right)^2 + \left(\frac{1}{75}\right)^2}$
 $= 0,0315$

$$U(p) = 0,008 \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

b. L'incertitude est de $0,008 \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, le résultat peut être écrit avec trois chiffres significatifs :

$$p = (0,263 \pm 0,008) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

14 Analyser une représentation graphique

1. La représentation **f** correspond à un système constamment immobile.

2. Les représentations graphiques correspondant à un mouvement uniforme sont **a** et **c**.

Les représentations graphiques correspondant à un mouvement uniformément varié sont **b** et **d**.

Remarque : la représentation graphique **e** peut être le résultat d'un mouvement uniforme ou d'une immobilité.

15 Reconnaître un mouvement

- Mouvement rectiligne uniforme.
- Mouvement rectiligne accéléré.
- Mouvement rectiligne ralenti.
- Mouvement curviligne uniforme.
- Mouvement circulaire uniforme.

16 Analyser un mouvement

1. À l'instant $t_1 = 0,2 \text{ s}$, $v_x = v_y = 2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

$$\text{donc : } v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = 2\sqrt{2} = 2,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

À l'instant $t_2 = 0,6 \text{ s}$, $v_x = 2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et $v_y = -2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,

$$\text{donc : } v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = 2\sqrt{2} = 2,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

2. La valeur de la vitesse de la bille décroît de $0,0 \text{ s}$ à $0,4 \text{ s}$.

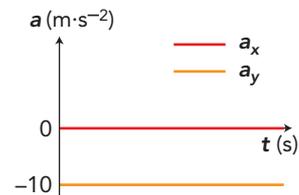
En effet, la valeur de v_x reste constante et la valeur de v_y diminue de 4 à $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Ensuite, la valeur de la vitesse de la bille croît de $0,4 \text{ s}$ à $0,8 \text{ s}$.

En effet, la valeur de v_x reste constante et la valeur de v_y augmente de 0 à $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

3. Les évolutions temporelles des coordonnées a_x et a_y sont représentées ci-dessous.

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} \quad \text{et} \quad a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{-4 - 4}{0,8 - 0} = -10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$



4. La valeur de l'accélération de la bille est :

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

Le mouvement est uniformément varié.

17 Connaître les lois de Newton

• *Première loi de Newton :*

Dans un référentiel galiléen, si un point matériel n'est soumis à aucune force ou s'il est soumis à un ensemble de forces qui se compensent, alors il reste immobile ou décrit un mouvement rectiligne et uniforme. Inversement, si un point matériel est en mouvement rectiligne uniforme, alors il est soumis à un ensemble de forces qui se compensent.

Exemple : un palet de curling qui glisse sur la glace.

• *Deuxième loi de Newton :*

Dans un référentiel galiléen $\Sigma \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$.

$\Sigma \vec{F}$ est la résultante des forces extérieures exercées sur le système, $\frac{d\vec{p}}{dt}$ est la variation de la quantité de mouvement de son centre d'inertie.

Exemple : soit un système soumis à une force constante (exemple : son poids $\vec{P} = m\vec{g}$) : $\vec{P} = \frac{d\vec{p}}{dt}$.

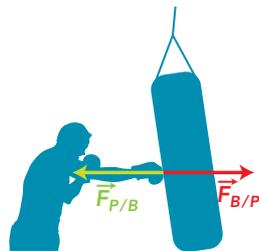
Si la masse m est constante : $\vec{P} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = m \cdot \vec{a}$.

Le vecteur accélération est constant et égal à \vec{g} . Le mouvement est uniformément accéléré. C'est le cas d'un objet assimilé à un point matériel lâché sans vitesse initiale dans le vide ou dans l'air (si son action peut être considérée comme négligeable).

• **Troisième loi de Newton :**

Si un corps A exerce sur un corps B une force $\vec{F}_{A/B}$, alors le corps B exerce sur le corps A une force $\vec{F}_{B/A}$ telle que $\vec{F}_{A/B} = -\vec{F}_{B/A}$.

Exemple : la force $\vec{F}_{B/P}$ exercée par le boxeur sur le punching-ball est opposée à la force $\vec{F}_{P/B}$ exercée par le punching-ball sur le boxeur (schéma ci-contre).

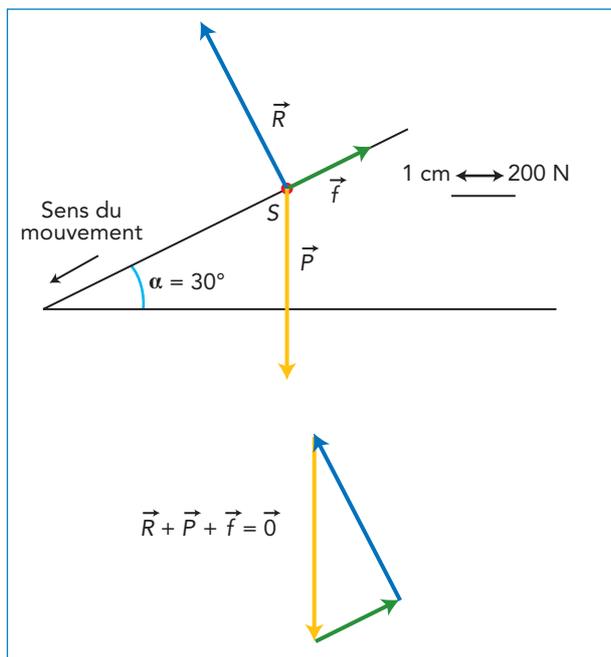


18 Déterminer des forces inconnues

1. Le skieur S a un mouvement rectiligne uniforme dans un référentiel terrestre supposé galiléen. Il est donc soumis à un ensemble de forces qui se compensent : $\vec{P} + \vec{R} + \vec{f} = \vec{0}$.

2. $P = M \cdot g = 600 \text{ N}$.

Schéma des vecteurs qui modélisent les forces :



3. Par lecture graphique, en tenant compte de l'échelle, on trouve :

$$f = 300 \text{ N} \quad \text{et} \quad R = 520 \text{ N}.$$

19 Exploiter les lois de Newton

a. Faux : d'après la première loi de Newton, son mouvement est obligatoirement rectiligne uniforme.

b. Faux : c'est la variation de la quantité de mouvement qui est égale à la résultante des forces.

c. Faux : d'après la troisième loi de Newton, ces deux forces sont toujours strictement opposées.

d. Vrai.

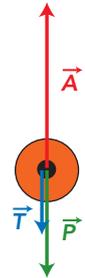
20 Étudier la propulsion d'un système isolé

1. Si le ballon est immobile, la somme des forces extérieures qu'il subit est nulle. Il est donc pseudo-isolé.

2. Le ballon immobile est soumis à trois forces : son poids \vec{P} , la tension du fil \vec{T} et la poussée d'Archimède \vec{A} .

3. L'hélium est expulsé vers le bas, le ballon s'élève en se dégonflant. C'est le principe de la propulsion par réaction.

4. Juste après l'ouverture, le système {hélium-ballon} peut toujours être considéré comme pseudo-isolé, la quantité de mouvement du ballon est strictement opposée à celle du gaz expulsé. Elle est donc verticale orientée vers le haut.



Pour s'entraîner

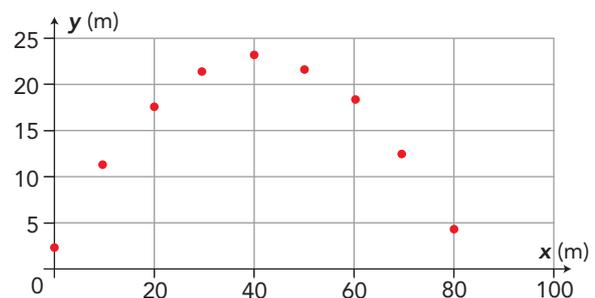
21 Coordonnées du vecteur position

1. La coordonnée suivant l'axe (Oz) de l'homme-canon est constante, nulle en l'occurrence. Seules ses coordonnées suivant (Ox) et (Oy) varient. Le mouvement a lieu dans le plan défini par le repère (O; \vec{i} , \vec{j}).

2. Coordonnées du point M toutes les 0,5 s, de 0 à 4 s :

t (s)	x (m)	y (m)
0	0	2,5
0,5	10	11,275
1	20	17,6
1,5	30	21,475
2	40	22,9
2,5	50	21,875
3	60	18,4
3,5	70	12,475
4	80	4,1

Position de l'homme-canon :



3. Graphiquement, on observe qu'il faut placer le matelas de réception à 84 m du canon.

Remarque : la distance est en réalité inférieure, car les frottements de l'air ne sont pas négligeables.

22 Calculer les coordonnées des vecteurs vitesse et accélération

1. $x = 20 t$; $y = -4,9 t^2 + 20 t + 2,5$;

$$v_x = \frac{dx}{dt} = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad \text{et} \quad v_y = \frac{dy}{dt} = -9,8 t + 20.$$

2. À la date $t_1 = 1 \text{ s}$, \vec{v}_1 a pour coordonnées :

$$v_{1x} = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad \text{et} \quad v_{1y} = 10,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1};$$

$$v_1 = \sqrt{v_{1x}^2 + v_{1y}^2} = \sqrt{20^2 + 10,2^2} = 22,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

3. $a_x = \frac{dv_x}{dt} = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ et $a_y = \frac{dv_y}{dt} = -9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

4. La valeur du vecteur accélération est constante. Le mouvement est uniformément varié.

23 Saut en parachute

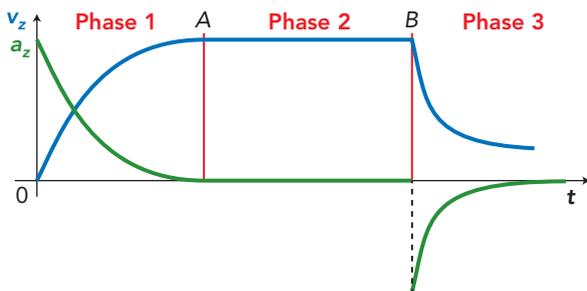
1. Le mouvement du parachutiste est vertical orienté vers le bas. Comme la coordonnée verticale v_z de sa vitesse est positive, l'axe (Oz) vertical est orienté vers le bas.

2. Le mouvement est rectiligne et vertical, la valeur de la vitesse est donc égale à v_z .

Au cours de la première phase, le mouvement est accéléré, il est ensuite uniforme (deuxième phase), puis ralenti (troisième phase). Au point B, le parachute s'ouvre.

3. $a_z = \frac{dv_z}{dt}$

Graphiquement, a_z est égale au coefficient directeur de la tangente à la courbe $v_z = f(t)$ au point d'abscisse donné.



24 Arrivée en gare d'un TGV

1. Phase 1 : de $t_0 = 0 \text{ min}$ à $t_5 = 5 \text{ min}$, le TGV a un mouvement rectiligne décéléré.

Phase 2 : de $t_5 = 5 \text{ min}$ à $t_{10} = 10 \text{ min}$, le TGV a un mouvement rectiligne uniforme.

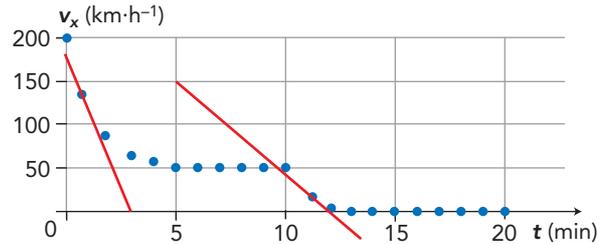
Phase 3 : de $t_{10} = 10 \text{ min}$ à $t_{13} = 13 \text{ min}$, le TGV a un mouvement rectiligne décéléré.

Phase 4 : $t > 13 \text{ min}$, le TGV est immobile.

2. Entre les dates $t_5 = 5 \text{ min}$ et $t_{10} = 10 \text{ min}$, puis à partir de $t_{13} = 13 \text{ min}$, la valeur v_x est constante,

donc la coordonnée de l'accélération $a_x = \frac{dv_x}{dt}$ est nulle (voir schéma ci-après).

3. La coordonnée a_x de l'accélération est égale au coefficient directeur de la tangente à la courbe $v_x = f(t)$ au point d'abscisse considéré :



À $t_1 = 2 \text{ min}$:

$$a_1 = \frac{\frac{180}{3,6}}{3,0 \times 60} = 0,28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

À $t_1 = 11 \text{ min}$:

$$a_2 = \frac{\frac{180}{3,6}}{7,0 \times 60} = 0,10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

25 À chacun son rythme

1. La masse de Julie est constante, sa quantité de mouvement \vec{p} évolue comme sa vitesse. Lors de chaque phase, \vec{p} est verticale.

– Descente accélérée : \vec{p} , orientée vers le bas, augmente.

– Descente ralentie : \vec{p} , orientée vers le bas, diminue.

– Remontée accélérée : \vec{p} , orientée vers le haut, augmente.

– Remontée ralentie : \vec{p} , orientée vers le haut, diminue.

2. D'après la deuxième loi de Newton :

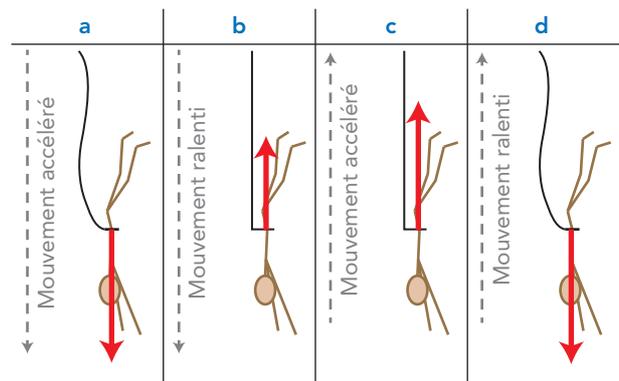
– Descente accélérée : $\sum \vec{F}$ est dirigée vers le bas.

– Descente ralentie : $\sum \vec{F}$ est dirigée vers le haut.

– Remontée accélérée : $\sum \vec{F}$ est dirigée vers le haut.

– Remontée ralentie : $\sum \vec{F}$ est dirigée vers le bas.

3. Schématisation des résultantes :

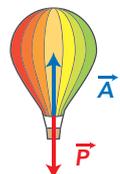


26 Ascension d'une montgolfière

Un référentiel terrestre est considéré galiléen.

1. La montgolfière a un mouvement rectiligne uniforme. D'après la première loi de Newton, la résultante des forces est nulle (dessin ci-contre) :

$$\vec{P} = -\vec{A}$$



2. a. La montgolfière s'élève verticalement en accélérant (dessin ci-contre) :

$$P < A$$



b. La montgolfière s'élève verticalement en ralentissant (dessin ci-contre) :

$$P > A$$



27 Les jetpacks

1. a. La quantité de mouvement d'un système ponctuel est le produit de sa masse par son vecteur vitesse :

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$$

b. La quantité de mouvement se conserve pour un système isolé ou pseudo-isolé.

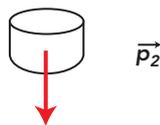
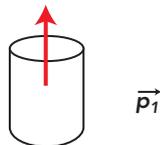
2. Soit un système initial au repos : sa quantité de mouvement est nulle.

Si ce système se sépare en deux parties, la quantité de mouvement de l'ensemble reste nulle, donc les deux parties ont des quantités de mouvement opposées.

Avant : $\vec{p} = \vec{0}$



Après : $\vec{p} = \vec{0}$
donc $\vec{p}_1 = -\vec{p}_2$

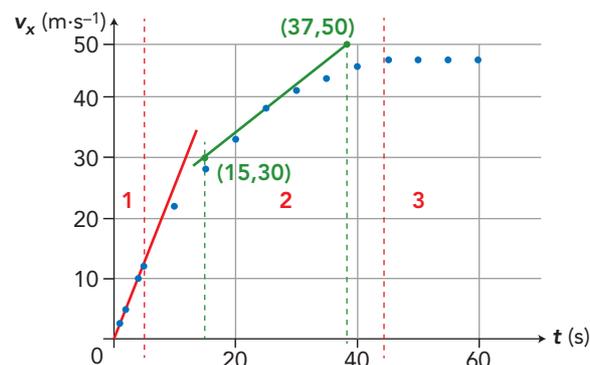


L'objet le plus léger a la plus grande valeur de vitesse.

3. L'explication donnée à la fin du texte ne traduit pas la conservation de la quantité de mouvement mais la deuxième loi de Newton.

28 Voiture au banc d'essai

1. a.



b. De $t = 0$ s à $t = 5$ s, le mouvement de la voiture est uniformément accéléré (évolution de la vitesse pro-

portionnelle au temps). La valeur de l'accélération est constante.

De $t = 5$ s à $t = 45$ s, le mouvement est toujours accéléré, mais la valeur de l'accélération diminue au cours du temps.

À partir de $t = 45$ s, le mouvement est uniforme, la valeur de l'accélération est nulle.

2. a. On peut déterminer la valeur de l'accélération de la voiture à partir de la représentation temporelle de la valeur de la vitesse en calculant le coefficient directeur de la tangente à la courbe à l'instant considéré.

b. Dans la première phase, l'accélération du véhicule est constante.

Sa valeur vaut $a = 2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

c. On calcule le coefficient directeur de la tangente à la courbe à $t = 25$ s :

$$a = \frac{50 - 30}{37 - 15} = 0,91 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

3. La voiture est soumise à son poids, \vec{P} , à la réaction normale de la route, \vec{R}_N , et à la force de frottements de la route, \vec{f} . On néglige les frottements de l'air ainsi que la poussée d'Archimède. La deuxième loi de Newton permet d'écrire :

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

En projetant cette égalité vectorielle sur l'axe (Ox), on peut écrire :

$$f = m \cdot a_x = 1200 \times 0,91 = 1,1 \times 10^3 \text{ N}$$

D'après la troisième loi de Newton, la force motrice de la voiture $\vec{F} = -\vec{f}$, d'où :

$$F = 1,1 \times 10^3 \text{ N}$$

La valeur de la force motrice de la voiture à la date $t = 25$ s est de $1,1 \times 10^3 \text{ N}$.

Pour aller plus loin

29 Le thermomètre de Galilée

1. Quand une ampoule est immobile (première loi de Newton) :

$$\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{P} + \vec{A} = \vec{0} \quad \text{d'où} \quad \vec{P} = -\vec{A}$$

2. a. Si ρ diminue, la valeur de \vec{A} diminue aussi, donc P devient supérieur à A .

$\vec{P} + \vec{A}$ est vertical vers le bas.

b. L'ampoule a un mouvement vertical descendant accéléré, au moins dans la première partie de la chute. Elle s'arrête quand elle touche le fond ou une autre ampoule.

3. Quand la température diminue, la masse volumique ρ de l'alcool augmente, il en est de même pour la valeur de \vec{A} . La valeur du poids devient inférieure à celle de la poussée d'Archimède.

$\vec{P} + \vec{A}$ est vertical vers le haut.

L'ampoule monte en accélérant dans la première phase du mouvement. Elle s'arrête quand elle flotte ou quand elle est en contact avec une autre ampoule.

4. Selon leur masse, les différentes ampoules peuvent rester en suspension pour une valeur donnée de la densité de l'éthanol, donc pour une valeur donnée de la température.

La température est indiquée par l'ampoule en suspension dans le liquide. Les ampoules plus lourdes, associées à des températures plus faibles, ont coulé au fond du tube ; les ampoules plus légères, associées à des températures plus élevées, flottent à la surface du liquide.

30 Décollage d'Ariane 5

1. $P = M \times g = 7,3 \times 10^6 \text{ N}$; $F = 1,16 \times 10^7 \text{ N}$.
À l'échelle 1 cm pour $5 \times 10^6 \text{ N}$, \vec{P} est représenté par un segment fléché de longueur 1,5 cm et \vec{F} par un segment fleché de longueur 2,3 cm.



2. D'après la deuxième loi de Newton :

$$\Sigma \vec{F} = \vec{P} + \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = M \cdot \vec{a}$$

La projection de l'égalité vectorielle précédente suivant l'axe vertical (Oy) (orienté vers le haut), donne :

$$M \cdot a = F - P$$

L'expression de la coordonnée verticale de l'accélération du point G s'écrit $a = \frac{F - P}{M}$.

Elle a pour valeur $a = \frac{1,16 \times 10^7 - 7,3 \times 10^6}{7,3 \times 10^5}$

soit : $a = 5,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

3. L'expression de la coordonnée verticale de la vitesse de la fusée est :

$$v = a \cdot t, \quad \text{car } a = \frac{dv}{dt}$$

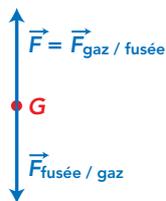
4. L'expression de la coordonnée verticale de la position de la fusée est :

$$y = \frac{a}{2} \cdot t^2, \quad \text{car } v = \frac{dy}{dt}$$

5. Jusqu'à la date $t_1 = 6,0 \text{ s}$, la fusée a parcouru :

$$y(6,0) = \frac{5,9}{2} \times 6,0^2 = 1,1 \times 10^2 \text{ m.}$$

6. La force de poussée provient de l'action sur la fusée des gaz éjectés, c'est la propulsion par réaction.



31 C'est la salsa!

1. a. Entre le temps 1 et le temps 2, les deux pieds sont immobiles.

b. Entre le temps 2 et le temps 3, le pied gauche est en mouvement.

2. a. Entre le temps 6 et le temps 7, les valeurs de la vitesse initiale et de la vitesse finale du pied droit sont nulles. Or, il y a eu un mouvement, la valeur de sa vitesse a donc dû être non nulle entre les deux positions. Entre les temps 6 et 7, la valeur de la vitesse du pied droit varie, son mouvement ne peut pas être uniforme.

b. Lors de sa mise en mouvement et de son arrêt, le pied droit accélère puis ralentit. Le mouvement du pied droit ne peut pas être uniformément varié.

3. Lorsque le pied se met en mouvement, le vecteur accélération est dans le sens du mouvement (vers

l'avant). Lorsque le pied ralentit, toujours en avançant, l'accélération est de sens opposé à celui du mouvement. L'accélération du pied droit change de sens entre les positions 6 et 7.

4. En position 1, le pied gauche est soumis au poids du corps et à l'action du sol.

Comme il est immobile dans un référentiel terrestre supposé galiléen, ces deux forces se compensent d'après la première loi de Newton.

5. D'après la troisième loi de Newton, la force exercée par la semelle gauche sur le sol et celle exercée par le sol sur la semelle ont même direction, même valeur et des sens opposés.

32 Mach's formulation of Newton's laws

Traduction du texte :

« Les lois de Newton ont été introduites ici de façon traditionnelle, à travers les concepts de masse et de force (NEWTON avait formulé la deuxième loi en termes de quantité de mouvement, pas d'accélération). Ernst MACH, qui a vécu en Allemagne, deux siècles après Newton, a essayé d'introduire un nouveau concept et de formuler la physique seulement en termes de ce qui peut être observé et mesuré. Il a fait valoir que les lois de Newton se résument à une seule loi : "Lorsque deux objets ponctuels agissent l'un sur l'autre, ils accélèrent dans des directions opposées, et le rapport de leurs accélérations est toujours le même."

Relisez, si vous voulez : aucune mention de force ou de masse, seulement d'accélération, ce qui peut être mesuré. Quand un pistolet agit sur une balle, une fusée sur son jet d'échappement, le Soleil sur la Terre (et sur l'échelle de la distance séparant les deux, le Soleil et la Terre peuvent être considérés comme des objets ponctuels), les accélérations sont toujours en sens opposés. »

1. Ernst MACH ne fait intervenir, dans sa formulation, que les accélérations des corps en interaction.

2. Cette formulation n'est valable que dans les référentiels galiléens.

3. Lorsque deux corps A et B, de masses respectives m_A et m_B , sont en interaction, la troisième loi de Newton indique que $\vec{F}_{A/B} = -\vec{F}_{B/A}$.

$$\vec{F}_{A/B} \text{ s'exerce sur B : } \vec{F}_{A/B} = m_B \cdot \vec{a}_B$$

$$\vec{F}_{B/A} \text{ s'exerce sur A : } \vec{F}_{B/A} = m_A \cdot \vec{a}_A$$

$$\text{On a donc } m_B \cdot \vec{a}_B = -m_A \cdot \vec{a}_A$$

Les accélérations ont bien des sens opposés et le rapport de leurs valeurs est lié au rapport des masses par la relation :

$$\frac{a_A}{a_B} = \frac{m_B}{m_A}$$

33 Rien ne sert de courir...

1. a. Si D est la distance entre l'arbre et la ligne d'arrivée, il faut $\Delta t = \frac{D - d}{v_0} = 0,2 \text{ s}$ à la Tortue pour l'atteindre.

b. À $v_1 = 18,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, le Lièvre parcourrait :

$$d_1 = v_1 \cdot \Delta t = 18,0 \times 2,0 = 36 \text{ m.}$$

On ne peut pas prévoir le résultat de la course, car la valeur de la vitesse du Lièvre est, au maximum, égale à v_1 . Il parcourt en réalité moins de 36 m en 2 s. On ne sait pas, par contre, s'il parcourt plus de 20 m pendant cette durée.

2. Le premier système est la Tortue assimilée à un point T .

Le deuxième système est le Lièvre assimilé à un point L .

Le mouvement de T est rectiligne uniforme. L'équation horaire du mouvement de T est :

$$x_{T_1}(t) = v_0 \cdot t + d$$

Le mouvement de L est rectiligne uniformément accéléré.

L'équation horaire du mouvement de L est :

$$x_{L_1}(t) = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \quad \text{avec } a = 9,00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

L'équation horaire de sa vitesse est $v_{L_1} = \frac{dx_{L_1}(t)}{dt} = 9,00 \text{ t}$.

3. À la fin de la première phase :

$$v_{L_1} = 18,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = a \cdot t_1$$

donc : $t_1 = \frac{18,0}{9,00} = 2,00 \text{ s}$.

Le Lièvre atteint sa vitesse maximale au bout de $t_1 = 2,00 \text{ s}$.

À cette date, le Lièvre a parcouru la distance :

$$x_{L_1}(t_1) = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t_1^2$$

soit :

$$x_{L_1}(t_1) = \frac{1}{2} \times 9,00 \times 2,00^2 = 18,0 \text{ m}.$$

Position de la Tortue à la fin de la phase d'accélération du Lièvre :

$$x_{T_1}(t_1) = 0,25 \times 2,00 + 19,5 = 20,0 \text{ m}.$$

La Tortue est sur la ligne d'arrivée et le Lièvre est à 2,0 m. Le Lièvre a perdu.

4. Il s'agit de déterminer la durée t_2 nécessaire pour que le Lièvre parcoure 2,0 m.

Dans la deuxième phase, l'équation horaire du mouvement du Lièvre s'écrit :

$$x_{L_2}(t) = v_1 \cdot t$$

$$x_{L_2} = 18,0 t_2$$

soit :

$$t_2 = \frac{2,0}{18,0} = 0,11 \text{ s}.$$

Le Lièvre franchit la ligne d'arrivée 0,11 s après la Tortue.

Retour sur l'ouverture du chapitre

34 En impesanteur

1. a. L'impesanteur n'est pas l'absence de poids mais l'absence d'action s'opposant au poids d'un système et empêchant sa chute. Un système est en impesanteur lorsqu'il est en chute libre.

b. Au contraire, l'hyperpesanteur est une action opposée au poids et de valeur supérieure.

En hyperpesanteur, le passager de l'Airbus A300 Zéro-G subit son poids, mais aussi la force de poussée que l'avion lui transmet.

2. On appelle $h = 8000 \text{ m}$ l'altitude de l'avion.

$$g = G \frac{M}{(R+h)^2} = 6,67 \times 10^{-11} \frac{6,0 \times 10^{24}}{(6,4 \times 10^6 + 8000)^2} = 9,75 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

3. a. $v_x = \frac{dx}{dt} = 113 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

et $v_y = \frac{dy}{dt} = -2 \times 4,87 t + 113$

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

et $a_y = \frac{dv_y}{dt} = -2 \times 4,87 = -9,74 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Le vecteur accélération n'a qu'une composante verticale.

b. Le vecteur accélération a une valeur constante au cours de la parabole.

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = 9,74 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

c. Le vecteur accélération de l'airbus A300 Zéro-G est vertical, orienté vers le bas et a pour valeur $9,74 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = g$, d'où $\vec{a} = \vec{g}$.

Ce résultat est en accord avec les réponses aux questions 1a et 2 : l'airbus est exclusivement soumis à son poids à l'altitude considérée, il est en chute libre.

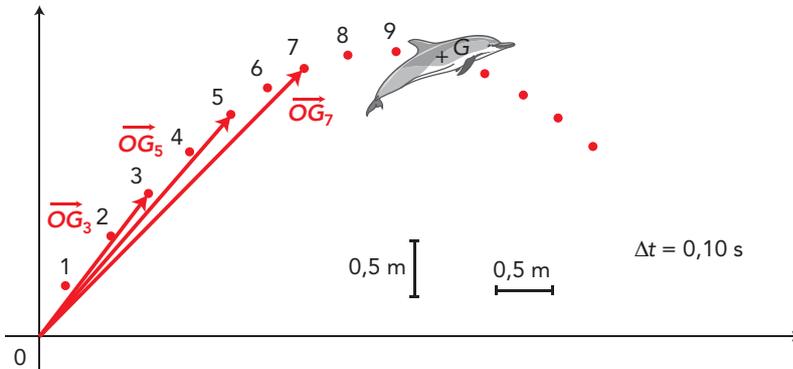
Comprendre un énoncé

35 Le dauphin à flancs blancs

1. Le référentiel d'étude est un référentiel terrestre supposé galiléen.

Les coordonnées du point 8 sont $x_8 = 2,9 \text{ m}$ et $y_8 = 2,7 \text{ m}$.

2.



3. La valeur de la vitesse au point 4 a pour expression :

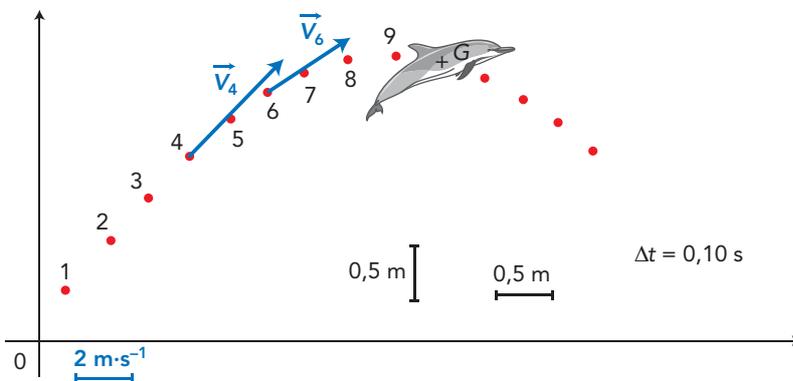
$$v_4 = \frac{G_3G_5}{2\Delta t} = \frac{1,07}{0,20} = 5,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

De même :

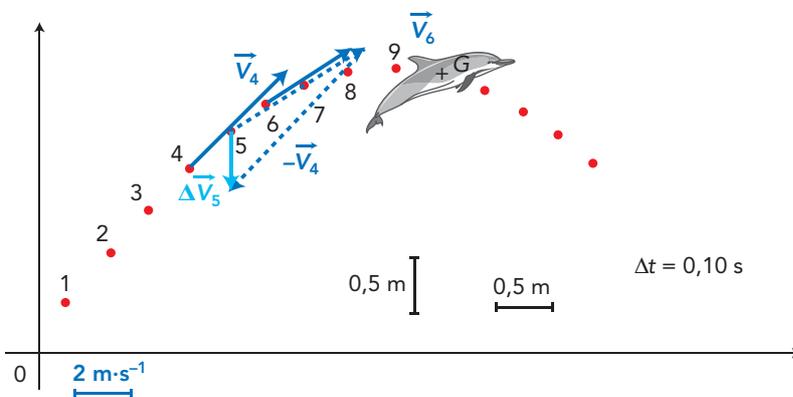
$$v_6 = \frac{G_5G_7}{2\Delta t} = 3,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

4. Le vecteur \vec{v}_4 est tangent à la trajectoire ; il est représenté par un segment fléché de 2,5 cm de longueur.

\vec{v}_6 est représenté par un segment fléché de 1,9 cm de longueur.

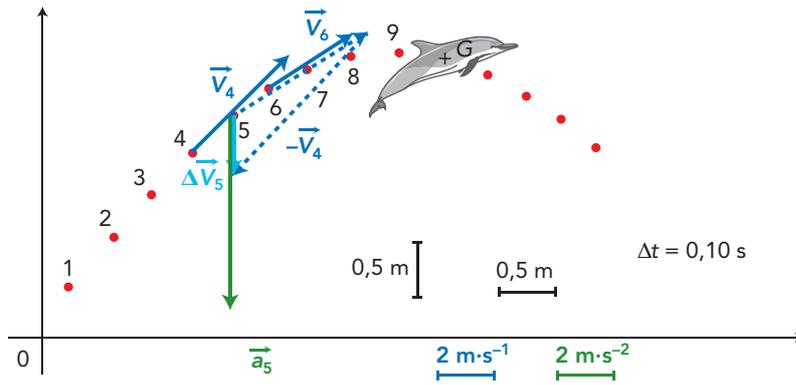


5. Le segment fléché a une longueur de 7 mm, donc le vecteur $\Delta\vec{v}_5$ a une valeur de $1,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



6. $a_5 = \frac{\Delta v_5}{2\Delta t} = \frac{1,4}{2 \times 0,10} = 7,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

7. Avec l'échelle 1 cm pour $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, le segment fléché représentant le vecteur \vec{a}_5 mesure 3,5 cm.



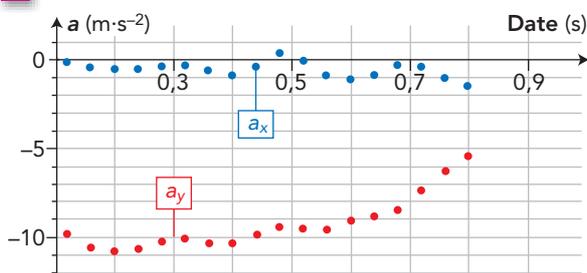
Application des lois de Newton et des lois de Kepler

Activités

1 Promenons-nous dans les champs (p. 156-157)

A Étude expérimentale d'un mouvement dans le champ de pesanteur uniforme

1 a.



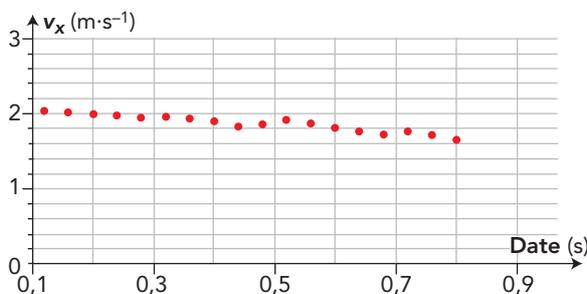
Graphiquement, on obtient :

$$a_x \approx 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

et

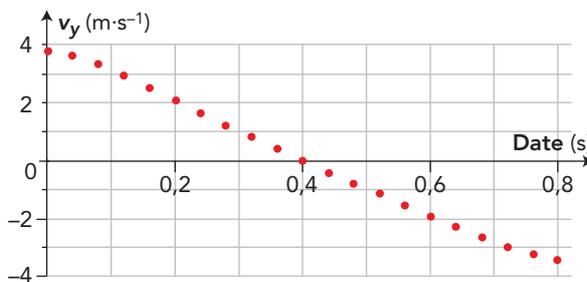
$$a_y = k_1 \approx -10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

b.



Graphiquement, on obtient :

$$v_x = k_2 \approx 2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$



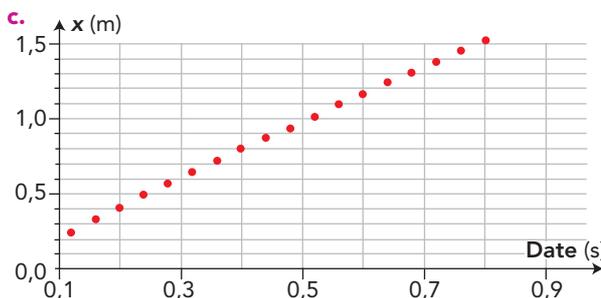
On obtient :

$$v_y = -9,8 t + 4,0;$$

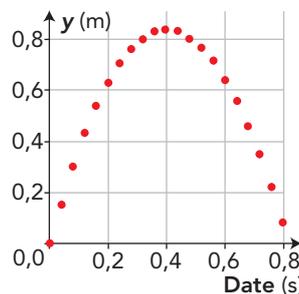
$$k_1 = -9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

et $k_3 = 4,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$

c.



On obtient : $x(t) = 1,9 t.$

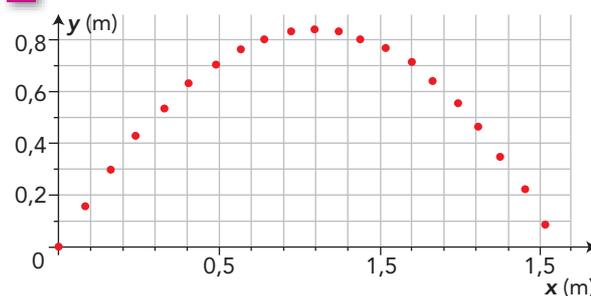


On obtient :

$$y(t) = -5,0 t^2 + 4,1 t;$$

$$k_4 = -5,0 = \frac{k_1}{2}.$$

2



On obtient : $y = -1,4 x^2 + 2,2 x.$

3 a. Comparaison : $\vec{a} = 0 \vec{i} - 10 \vec{j}.$

Les coordonnées du vecteur accélération sont identiques, aux imprécisions de mesure près, à celles du vecteur champ de pesanteur \vec{g} :

$$a_x \approx 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \text{ et } a_y \approx -10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2};$$

$$g_x = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \text{ et } g_y = -9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

b. Dans ce référentiel terrestre considéré galiléen, la deuxième loi de Newton appliquée au centre de la balle de masse m s'écrit :

$$\Sigma \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

On a : $\Sigma \vec{F} = \vec{P} = m \cdot \vec{g}$
 La masse de la balle ne variant pas, on peut écrire :

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m \cdot \vec{v})}{dt} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = m \cdot \vec{a}$$

d'où : $m \cdot \vec{a} = m \cdot \vec{g}$, soit $\vec{a} = \vec{g}$

On retrouve donc le résultat expérimental.

4 a. Le vecteur accélération est défini comme étant la dérivée temporelle du vecteur vitesse :

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$$

soit : $a_x = \frac{dv_x}{dt}$ et $a_y = \frac{dv_y}{dt}$

$a_x = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, la primitive de 0 par rapport au temps est une constante, d'où $v_x = \text{cte}$.

$a_y = -10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, la primitive d'une constante A par rapport au temps est de la forme $A \cdot t + B$ d'où :

$$v_y = a_y \cdot t + v_{0y}$$

Expérimentalement, on obtient :

$$v_x = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad \text{et} \quad v_y = -9,8 t + 4,0$$

b. Le vecteur vitesse est défini comme étant la dérivée temporelle du vecteur position $\vec{OG} : \vec{v} = \frac{d\vec{OG}}{dt}$,

soit : $v_x = \frac{dx}{dt}$ et $v_y = \frac{dy}{dt}$

$v_x = \text{cte}$, la primitive par rapport au temps d'une constante s'écrit $x = v_x \cdot t + x_0$.

$v_y = a_y \cdot t + v_{0y}$, la primitive par rapport au temps d'une fonction $A \cdot t + B$ est de la forme :

$$\frac{1}{2} A \cdot t^2 + B \cdot t + C$$

donc : $y = \frac{1}{2} a_y \cdot t^2 + v_{0y} \cdot t + y_0$

Expérimentalement, on obtient :

$$x(t) = 1,9 t \quad \text{et} \quad y(t) = -5,0 t^2 + 4,1 t.$$

5 a. Voir le cours.

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

Expérimentalement, on obtient :

$$y = -1,4 x^2 + 2,2 x$$

b. Par identification :

$$\frac{g}{2 (v_0 \cdot \cos \alpha)^2} = 1,4 \quad \text{et} \quad \tan \alpha = 2,2$$

B Simulation de mouvements dans des champs uniformes

6 Dans un référentiel terrestre considéré galiléen, la deuxième loi de Newton appliquée à un point matériel P de masse m s'écrit :

$$\Sigma \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

On a : $\Sigma \vec{F} = \vec{P} = m \cdot \vec{g}$

La masse du point matériel ne variant pas, on peut écrire :

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m \cdot \vec{v})}{dt} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = m \cdot \vec{a}$$

d'où $m \cdot \vec{a} = m \cdot \vec{g}$, soit $\vec{a} = \vec{g}$

Le mouvement du système ne dépend pas de sa masse.

7 L'équation étant $y = -\frac{g}{2(v_0 \cdot \cos \alpha)^2} \cdot x^2 + \tan \alpha \cdot x$,

l'allure de la trajectoire dépend de la valeur v_0 de la vitesse initiale, de la valeur g du champ de pesanteur, ainsi que de l'angle α entre l'horizontale et le vecteur \vec{v}_0 .

8 Dans un référentiel terrestre considéré galiléen, la deuxième loi de Newton appliquée à un point matériel P de masse m s'écrit :

$$\Sigma \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

On a : $\Sigma \vec{F} = \vec{F} = q \cdot \vec{E}$

La masse du point matériel ne variant pas, on peut écrire :

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m \cdot \vec{v})}{dt} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = m \cdot \vec{a}$$

d'où : $m \cdot \vec{a} = q \cdot \vec{E}$, soit $\vec{a} = \frac{q \cdot \vec{E}}{m}$

L'accélération et donc le mouvement du système dépendent de sa masse.

9 L'équation étant $y = -\frac{q \cdot E}{2m (v_0 \cdot \cos \alpha)^2} \cdot x^2 + \tan \alpha \cdot x$,

l'allure de la trajectoire dépend de la valeur v_0 de la vitesse initiale, de l'angle α entre l'horizontale et le vecteur \vec{v}_0 , de la masse m du point matériel, de la valeur E du champ électrostatique ainsi que de sa charge électrique q .

10 Dans un référentiel donné, les paramètres pouvant avoir une influence sur le mouvement du système sont :

Paramètres relatifs au système	Paramètres relatifs aux conditions initiales	Paramètres relatifs au milieu extérieur
Masse	Vecteur vitesse initial	Champ de pesanteur \vec{g}
Charge électrique	Position initiale	Champ électrostatique \vec{E}

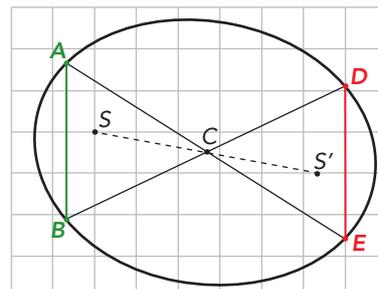
2 Lois de Kepler (p. 158-159)

B Vérification des trois lois de Kepler pour la planète Mercure

Première loi de Kepler

Méthode de recherche du deuxième foyer S' de l'ellipse :

- Tracer deux segments $[AB]$ et $[DE]$ parallèles et de même longueur, avec A, B, D et E quatre points de l'ellipse.
- Tracer les diagonales $[AE]$ et $[BD]$. Elles se coupent en C , le centre de l'ellipse.
- Le deuxième foyer S' est le symétrique de S par rapport à C .



1 Pour mettre en évidence la première loi de Kepler, choisir différents points M sur la trajectoire de Mercure et mesurer les distances MS et MS' . Vérifier que leur somme est constante.

Exemples de mesures :

MS (pixels)	MS' (pixels)	$MS + MS'$ (pixels)
270	313	583
316	262	578
348	237	575
267	310	577
346	234	580
352	230	582

La première loi de Kepler est bien vérifiée.

Deuxième loi de Kepler

2 Le mouvement de Mercure n'est pas uniforme, la valeur de la vitesse de la planète augmente lors de son passage à proximité du Soleil.

	Groupe 1		Groupe 2		Groupe 3		Groupe 4		Moyenne	σ_{n-1}
En pixels	34589	32969	32900	33417	35042	35934	35900	34798	34444	1222
En %	3,73 %	3,56 %	3,55 %	3,61 %	3,78 %	3,88 %	3,87 %	3,75 %	3,72 %	0,13 %

La collecte des mesures des différents groupes évite un trop grand nombre de mesures à chacun (éliminer les valeurs manifestement fausses, liées à des erreurs de zonage).

L'incertitude de répétabilité associée à un niveau de confiance de 95 % s'exprime par :

$$U(S) = k \cdot \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$$

où $k = 2,37$ et $n = 8$ (voir fiche n° 3, p. 584 du manuel) :

$$U(S) = 2,37 \times \frac{1222}{\sqrt{8}} = 1023 \text{ pixels.}$$

L'incertitude relative vaut 3 %.

La deuxième loi de Kepler est vérifiée.

Troisième loi de Kepler

Planète	Mercure	Vénus	Terre	Mars
$T(j)$	87,93	224,72	365,25	686,73
$2a$ (pixels)	294	546	756	1142
$2a$ (ua)	0,78	1,4	2,0	3,0
$\frac{T^2}{a^3}$ en $j^2 \cdot ua^{-3}$	$1,30 \times 10^5$	$1,47 \times 10^5$	$1,33 \times 10^5$	$1,40 \times 10^5$

Valeur moyenne : $1,38 \times 10^5 j^2 \cdot ua^{-3}$.

Écart-type : $\sigma_{n-1} = 7,47 \times 10^3 j^2 \cdot ua^{-3}$.

L'incertitude de répétabilité associée à un niveau de confiance de 95 % s'exprime par :

$$U(S) = k \cdot \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$$

où $k = 3,18$ et $n = 4$ (voir fiche n° 3, p. 584 du manuel) :

$$U\left(\frac{T^2}{a^3}\right) = 3,18 \times \frac{7,47 \times 10^3}{\sqrt{4}} = 1,19 \times 10^4 j^2 \cdot ua^{-3}.$$

L'incertitude relative vaut 8,6 %.

La troisième loi de Kepler est vérifiée pour ces quatre planètes.

5 La valeur moyenne du rapport $\frac{T^2}{a^3}$ a pour valeur :

$$1,38 \times 10^5 j^2 \cdot ua^{-3} = \frac{1,38 \times 10^5 \times (24 \times 3600)^2}{(1,50 \times 10^{11})^3}$$

$$= 3,05 \times 10^{-19} s^2 \cdot m^{-3}$$

$$\frac{4\pi^2}{G \cdot M_{\text{soleil}}} = \frac{4\pi^2}{6,67 \times 10^{-11} \times 2,0 \times 10^{30}}$$

$$= 2,96 \times 10^{-19} s^2 \cdot m^{-3}.$$

L'écart relatif est d'environ 3 %. On peut considérer que les valeurs sont égales.

3 Satellisation (p. 160-161)

1 a. Les satellites géostationnaires permettent de toujours observer la même zone de la surface de la Terre et d'avoir des informations en temps réel.

b. Il faut également utiliser des satellites à orbite polaire pour pouvoir obtenir convenablement la situation météo des pôles. En effet, les satellites géostationnaires situés dans le plan équatorial ne peuvent pas avoir une observation précise des pôles.

2

Nom	Masse (kg)	Altitude (km)	Période	Année de lancement	Utilisation
Demeter	125	710	1 h 39 min	2004	Observations géophysiques
Giove A	700	23 258	14 h 05 min	2005	Système de positionnement Galileo
Hot Bird 7A	4 100	35 786	23 h 54 min	2006	Télécommunications (TV)
Jason-2	500	1 332	112 min	2008	Observations des océans

D'après la troisième loi de Kepler : $cste = \frac{T^2}{a^3}$

Cette constante peut être calculée grâce aux informations que l'on donne sur le satellite Giove A :

$$cste = \frac{(14 \times 3600 + 5 \times 60)^2}{(23258 \times 10^3 + 6400 \times 10^3)^3} = 9,85 \times 10^{-14} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$$

Pour calculer l'altitude z :

$$z = \left(\frac{T^2}{cste} \right)^{1/3} - R_T$$

Ainsi $z(\text{Jason-2}) = 1332 \text{ km}$
et $z(\text{Meteosat-9}) = 35835 \text{ km}$.

Pour calculer la période T :

$$T = (cste \times (R_T + z)^3)^{1/2}$$

Ainsi, $T(\text{Demeter}) = 5951 \text{ s}$, soit 1 h et 39 min et
 $T(\text{Hot Bird 7A}) = 86000 \text{ s}$, soit 23 h et 54 min.

3 a. Les valeurs de v_1 et v_2 sont :

$$\bullet v_1 = \sqrt{\frac{G \cdot M_T}{R_T}}$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{6,67 \times 10^{-11} \times 5,97 \times 10^{24}}{6,37 \times 10^6}} = 7,91 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\bullet v_2 = 7,91 \times 10^3 \times \sqrt{2} = 1,12 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

b. Pour qu'un objet soit satellisé, il faut qu'il reste en orbite autour de la Terre, donc que la valeur v de sa vitesse soit comprise entre les valeurs des deux vitesses cosmiques.

4 Les déchets qui restent en orbite, circulaire ou elliptique, autour de la Terre sont des satellites. En entrant en collision avec des satellites/astronautes à grande vitesse, ces déchets constituent un danger, d'autant que les plus petits d'entre eux sont difficilement repérables et que toute collision augmente le nombre de débris.

Exercices (p. 169-181)

QCM

1 1. C; 2. B; 3. B; 4. A; 5. A; 6. A; 7. C;

2 1. B; 2. B; 3. A; 4. B et C.

Application immédiate

3 Déterminer la trajectoire d'une particule dans un champ uniforme

1. Le système est le proton; on choisit un référentiel terrestre supposé galiléen pour étudier son mouvement.

D'après la deuxième loi de Newton :

$$\vec{F} = m_p \cdot \vec{a} \quad \text{avec } \vec{F} = e \cdot \vec{E} \quad \text{et } \vec{E} = \begin{pmatrix} 0 \\ -E \end{pmatrix}$$

d'où :

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} a_x = 0 \\ a_y = -\frac{e \cdot E}{m_p} \end{pmatrix}$$

$$\vec{v}_0 \begin{pmatrix} v_{x0} = v_0 \cdot \cos \alpha \\ v_{y0} = v_0 \cdot \sin \alpha \end{pmatrix}$$

$$\vec{v} \begin{pmatrix} v_x = v_0 \cdot \cos \alpha \\ v_y = -\frac{e \cdot E}{m_p} \cdot t + v_0 \cdot \sin \alpha \end{pmatrix}$$

$$\vec{OG} \begin{pmatrix} x = v_0 \cdot \cos \alpha \cdot t \\ y = -\frac{1}{2} \frac{e \cdot E}{m_p} \cdot t^2 + v_0 \cdot \sin \alpha \cdot t \end{pmatrix}$$

2. Équation de la trajectoire :

$$y = -\frac{1}{2} \frac{e \cdot E}{m_p} \cdot \frac{x^2}{v_0^2 \cdot \cos^2 \alpha} + x \cdot \tan \alpha$$

La trajectoire est une portion de parabole.

3. Lorsque la particule sort au point S : $x_S = \ell$.

$$y_S = -\frac{1}{2} \frac{e \cdot E}{m_p} \cdot \frac{\ell^2}{v_0^2 \cdot \cos^2 \alpha} + \ell \cdot \tan \alpha$$

Le proton sort au point S de coordonnées :

$$\vec{OS} \begin{pmatrix} x_S = 10,0 \times 10^{-2} \\ y_S = 1,47 \times 10^{-2} \end{pmatrix}$$

4 Calculer une période de révolution

Système : {satellite} noté S de masse m ; référentiel géocentrique.

Bilan des forces : force gravitationnelle $\vec{F}_{L/S}$ exercée par la Lune sur le satellite.

L'application de la deuxième loi de Newton conduit à :

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{L/S}}{m}$$

L'expression de la force d'attraction gravitationnelle exercée par la Lune est :

$$\vec{F}_{L/S} = G \cdot \frac{m \cdot M_L}{(r+z)^2} \cdot \vec{n}$$

Il vient :

$$\vec{a} = \frac{G \cdot \frac{m \cdot M_L}{(r+z)^2}}{m} \cdot \vec{n}$$

soit :

$$\vec{a} = \frac{G \cdot M_L}{(r+z)^2} \cdot \vec{n}$$

Il n'y a pas d'accélération tangentielle, donc la valeur de la vitesse v est constante. Ce mouvement circulaire est donc uniforme.

En identifiant l'expression ci-dessus à :

$$\vec{a} = \frac{dv}{dt} \cdot \vec{t} + \frac{v^2}{(r+z)} \cdot \vec{n}$$

on en déduit :

$$\frac{v^2}{r+z} = \frac{G \cdot M_L}{(r+z)^2}$$

d'où : $v = \sqrt{\frac{G \cdot M_L}{r+z}}$, soit $v = 1,68 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

T est la durée pour effectuer un tour. Elle est égale au périmètre de la trajectoire circulaire divisé par la valeur de la vitesse du satellite :

$$T = \frac{2\pi \cdot (r+z)}{v} \text{ soit } T = 6,50 \times 10^3 \text{ s.}$$

Pour commencer

5 Faire un inventaire de forces

– Système : {cycliste}

Bilan des forces extérieures appliquées au centre de gravité du système : poids, réaction de la route, forces de frottement de l'air, poussée d'Archimède.

– Système : {satellite}

Bilan des forces extérieures appliquées au centre de gravité du système : force d'attraction gravitationnelle exercée par la Terre $\vec{F}_{T/S}$.

– Système : {Terre}

Bilan des forces extérieures appliquées au centre de gravité du système : force d'attraction gravitationnelle exercée par le Soleil $\vec{F}_{T/S}$.

6 Exprimer le vecteur accélération

1. Système : {bille} de masse m .

Référentiel terrestre considéré galiléen.

2. Bilan des forces extérieures : poids.

D'après la deuxième loi de Newton :

$$\sum \vec{F} = \vec{P} = m \cdot \vec{g}$$

De plus, la masse de la balle ne variant pas, on peut écrire :

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m \cdot \vec{v})}{dt} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = m \cdot \vec{a}$$

d'où : $m\vec{g} = m\vec{a}$, soit $\vec{a} = \vec{g}$

Dans le repère $(O; \vec{i}, \vec{j})$ choisi, $\vec{a} = 0\vec{i} - g\vec{j}$.

3. Les coordonnées du vecteur \vec{a} sont :

$$\vec{a} \begin{pmatrix} 0 \\ -g \end{pmatrix}$$

7 Exprimer le vecteur vitesse

1. À $t = 0$, la vitesse est :

$$\vec{v}_0 \begin{pmatrix} v_{x0} = v_0 \cdot \cos \alpha \\ v_{y0} = -v_0 \cdot \sin \alpha \end{pmatrix}$$

2. a. $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$

b. On cherche la primitive temporelle de chaque coordonnée du vecteur accélération :

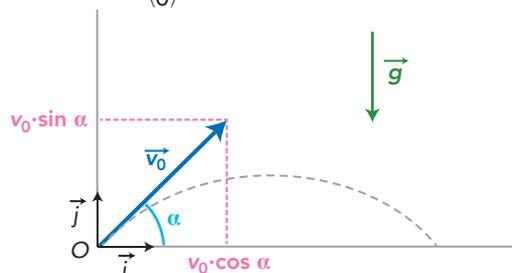
$$\vec{v} \begin{pmatrix} v_x = v_0 \cdot \cos \alpha \\ v_y = \frac{e \cdot E}{m} \cdot t - v_0 \cdot \sin \alpha \end{pmatrix}$$

8 Exprimer le vecteur position

1. On a choisi un référentiel terrestre adapté au mouvement de la boule.

2. Voir le cours, document 4a, p. 164 du manuel.

3. À $t = 0$, $\vec{OG}_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$.



4. $\vec{v} = \frac{d\vec{OG}}{dt}$

Une intégration permet de déterminer les coordonnées du vecteur position à partir de celles du vecteur vitesse :

$$\vec{OG} \begin{pmatrix} x = v_0 \cdot \cos \alpha \cdot t \\ y = -\frac{1}{2}g \cdot t^2 + v_0 \cdot \sin \alpha \cdot t \end{pmatrix}$$

9 Étudier un lancer de poids

1. a. La trajectoire d'un point est l'ensemble des positions successives occupées par ce point au cours de son mouvement. Son équation est du type $y = f(x)$.

b. La relation (C) doit être éliminée, car elle est du type $y = f(t)$.

2. a. À $t = 0$, le poids P est à une hauteur $y = h$:

$$\vec{OP}_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ h \end{pmatrix}$$

b. On élimine l'équation (A) où l'ordonnée de P à $t = 0$ est nulle.

(B) est l'équation de la trajectoire :

$$y = -\frac{1}{2}g \cdot \left(\frac{x}{v_0 \cdot \cos \alpha} \right)^2 + v_0 \cdot \tan \alpha \cdot x + h$$

10 Faire une analyse dimensionnelle

T représente la période de révolution de la planète exprimée en seconde.

r représente le rayon de la trajectoire circulaire exprimé en mètre.

M_S représente la masse du Soleil exprimée en kilogramme.

G est la constante de gravitation universelle :

$$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$$

On écrit l'unité de chaque membre de l'expression :

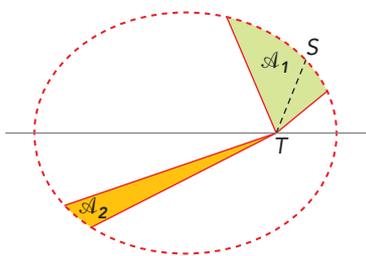
$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_S}$$

	Membre	Unité
Premier membre	$\frac{T^2}{r^3}$	$\frac{\text{s}^2}{\text{m}^3}$
Deuxième membre	$\frac{4\pi^2}{G \cdot M_S}$	$\frac{1}{\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kg}} \Leftrightarrow \frac{\text{s}^2}{\text{m}^3}$

Chacun des membres de l'expression ayant la même unité, l'expression est bien homogène.

11 Illustrer les lois de Kepler

1. Dans le référentiel géocentrique, la trajectoire du centre du satellite est une ellipse dont le centre de la Terre est l'un des foyers.



2. Le segment de droite [TS] reliant la Terre au satellite balaie des aires égales pendant des durées égales. A_1 et A_2 ont les mêmes surfaces.

12 Décrire le mouvement d'une planète

1. Un mouvement circulaire uniforme est un mouvement dont la trajectoire est un cercle (ou une portion de cercle) qui est parcourue avec une vitesse de valeur constante.

2. Le mouvement de Vénus (le système) est étudié dans le référentiel héliocentrique. Après avoir fait l'inventaire des forces exercées sur Vénus et défini le repère $(\vec{n}; \vec{t})$, on applique la deuxième loi de Newton. Le vecteur vitesse sera déduit du vecteur accélération ainsi obtenu. On en déduit la valeur de la vitesse de Vénus.

Pour s'entraîner

13 Phobos

1. Système : {Phobos} de masse M_{Ph} et référentiel marsocentrique (voir le schéma, p. 171).

2. Bilan des forces extérieures s'exerçant sur Phobos : $\vec{F}_{M/Ph}$

$$\vec{F}_{M/Ph} = G \cdot \frac{M_M \cdot M_{Ph}}{r^2} \cdot \vec{n}, \text{ avec } M_M \text{ la masse de Mars.}$$

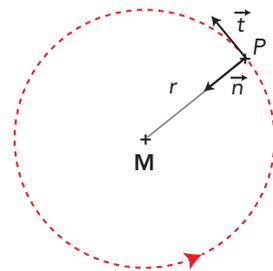
L'application de la deuxième loi de Newton conduit à :

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{M/Ph}}{M_{Ph}}$$

Il vient :

$$\vec{a} = \frac{G \cdot \frac{M_M \cdot M_{Ph}}{r^2}}{M_{Ph}} \cdot \vec{n}$$

$$\text{soit } \vec{a} = \frac{G \cdot M_M}{r^2} \cdot \vec{n}$$



3. En identifiant cette expression à :

$$\vec{a} = \frac{dv}{dt} \cdot \vec{t} + \frac{v^2}{r} \cdot \vec{n},$$

$$\text{on en déduit : } \begin{cases} \frac{dv}{dt} = 0 \\ \frac{v^2}{r} = \frac{G \cdot M_M}{r^2} \end{cases}$$

L'égalité $\frac{dv}{dt} = 0$ entraîne que la valeur de la vitesse v de Phobos est constante. Ce mouvement circulaire est donc uniforme.

14 Orientation du champ

1. Le système cation étudié dans un référentiel terrestre considéré galiléen est soumis à la force électrostatique $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ et à son poids que l'on négligera. D'après la deuxième loi de Newton :

$$\vec{a} = \frac{q \cdot \vec{E}}{m}$$

Puisqu'un cation est chargé positivement, le vecteur accélération est colinéaire et de même sens que le champ électrostatique.

a. \vec{E} doit être vertical ascendant.

b. \vec{E} doit être horizontal vers la gauche.

2. Pour le système anion, on a de même $\vec{a} = \frac{q \cdot \vec{E}}{m}$ mais avec une charge électrique négative.

Le vecteur accélération est colinéaire au champ électrostatique et de sens opposé.

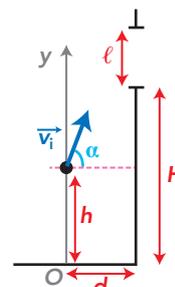
a. \vec{E} doit être vertical descendant.

b. \vec{E} doit être horizontal vers la droite.

3. Deux ions isotopes auront la même charge mais des masses différentes. Puisque l'accélération dépend de la masse du système, ces ions ne seront pas accélérés de la même manière par un champ électrostatique uniforme.

15 À chacun son rythme

1. Schéma de la situation :



2. Le mouvement du système {pierre}, assimilé à un point, est étudié dans un référentiel terrestre supposé galiléen. Il n'est soumis qu'à son poids dans l'hypothèse d'une chute libre.

Sachant que la masse de la pierre ne varie pas, la deuxième loi de Newton s'écrit :

$$\vec{P} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m\vec{a} \Leftrightarrow \vec{g} = \vec{a}$$

3. Pour un axe horizontal orienté dans le sens du mouvement et un axe vertical vers le haut :

$$a_x(t) = 0 \quad \text{et} \quad a_y(t) = -g$$

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$$

donc le vecteur vitesse a pour coordonnées :

$$v_x(t) = C_x \quad \text{et} \quad v_y(t) = -g \cdot t + C_y$$

Sachant qu'à $t = 0$:

$$v_x(0) = v_i \cdot \cos \alpha \quad \text{et} \quad v_y(0) = v_i \cdot \sin \alpha,$$

il vient, par identification :

$$v_x(t) = v_i \cdot \cos \alpha \quad \text{et} \quad v_y(t) = -g \cdot t + v_i \cdot \sin \alpha.$$

$\vec{v} = \frac{d\vec{OG}}{dt}$, une seconde intégration donne les équations horaires :

$$\begin{aligned} x(t) &= v_i \cdot \cos \alpha \cdot t + D_x \\ y(t) &= -\frac{1}{2}g \cdot t^2 + v_i \cdot \sin \alpha \cdot t + D_y \end{aligned}$$

Sachant qu'à $t = 0$, $x(0) = 0$ et $y(0) = h$, il vient, par identification :

$$\begin{aligned} x(t) &= v_i \cdot \cos \alpha \cdot t \\ y(t) &= -\frac{1}{2}g \cdot t^2 + v_i \cdot \sin \alpha \cdot t + h \end{aligned}$$

On retrouve les équations proposées.

4. L'équation de la trajectoire est obtenue en éliminant le temps dans la combinaison des équations horaires :

$$t = \frac{x}{v_i \cdot \cos \alpha}$$

d'où :

$$y(x) = -\frac{1}{2} \cdot \frac{g}{v_i^2 \cdot \cos^2 \alpha} \cdot x^2 + \tan \alpha \cdot x + h$$

5. On calcule l'ordonnée du point atteint par le caillou quand son abscisse est égale à $d = 2,0$ m :

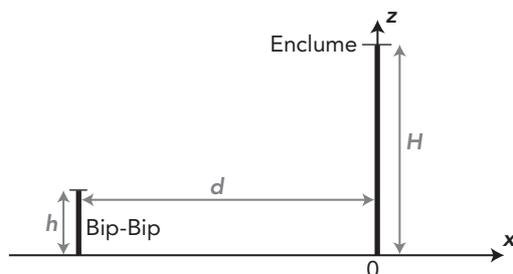
$$y(2,0) = \frac{-9,8 \times 2,0^2}{2 \times 10^2 \times \cos^2(60^\circ)} + \tan 60^\circ \times 2,0 + 2,0$$

$$y(2,0) = 4,7 \text{ m.}$$

Le bas de la fenêtre étant à 4,5 m au-dessus du sol et sa hauteur égale à 1,0 m, la pierre atteindra bien la fenêtre de Juliette.

16 Manquera, manquera pas ?

1. Schématisation de la situation à la date initiale :



2. a. Système {enclume} assimilée à son centre de gravité G. On choisit l'origine du repère au niveau du sol et on oriente l'axe vertical (Oz) vers le haut. L'enclume est soumise à son poids et, en négligeant toute autre force, la deuxième loi de Newton conduit, dans ce référentiel galiléen, à $\vec{a} = \vec{g}$.

Une première intégration donne :

$$\vec{v} \begin{pmatrix} 0 \\ -g \cdot t \end{pmatrix}$$

Une seconde intégration donne :

$$\vec{OG} \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{g}{2} \cdot t^2 + H \end{pmatrix}$$

Les coordonnées du vecteur position sont les équations horaires du mouvement.

b. Il s'agit d'un mouvement rectiligne, uniformément accéléré.

3. La chute est terminée à t_f lorsque $z(t_f) = 0$, soit :

$$0 = -\frac{g}{2} \cdot t_f^2 + H$$

$$t_f = \sqrt{\frac{2H}{g}}$$

L'application numérique donne :

$$t_f = \sqrt{\frac{2 \times 30,0}{9,81}} = 2,47 \text{ s.}$$

4. Dans le référentiel terrestre choisi, le mouvement de Bip-Bip est rectiligne uniforme. Sa vitesse v_0 est constante.

5. Soit t_B la date à laquelle l'enclume atteint la cote $z = h$ (c'est la cote correspondant à la hauteur de Bip-Bip) :

$$t_B = \sqrt{\frac{2(H-h)}{g}}$$

$$t_B = \sqrt{\frac{2 \times 28,8}{9,81}} = 2,42 \text{ s.}$$

Or, le temps mis par Bip-Bip pour atteindre l'endroit où tombera l'enclume est :

$$t_E = \frac{d}{v_0}, \quad \text{avec} \quad v_0 = 30,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$t_E = \frac{50,0}{30,6} = 1,64 \text{ s.}$$

$t_B > t_E$, donc Bip-Bip est passé au point de chute avant que l'enclume ne l'atteigne. Il ne se fait pas assommer.

17 Étude du canon à électrons

1. a. Système : {électron} de masse m_e et référentiel terrestre considéré galiléen.

Bilan des forces extérieures : force électrostatique \vec{F} . D'après la deuxième loi de Newton et comme la masse de l'électron est constante :

$$\vec{F} = m_e \cdot \vec{a}. \quad \text{Or,} \quad \vec{F} = -e \cdot \vec{E}$$

donc :

$$\vec{a} \begin{pmatrix} a_x = \frac{e \cdot E}{m_e} \\ a_y = 0 \end{pmatrix}$$

Par intégration et sachant que $\vec{v}_0 \begin{pmatrix} v_{x0} = 0 \\ v_{y0} = 0 \end{pmatrix}$:

$$\vec{v} \begin{pmatrix} v_x = \frac{e \cdot E}{m_e} \cdot t \\ v_y = 0 \end{pmatrix}$$

b. $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = v_x = \frac{e \cdot E}{m_e} \cdot t$

2. Par intégration, sachant qu'à $t = 0$, la particule est en O :

$$\vec{OG} \begin{pmatrix} x = \frac{1}{2} \cdot \frac{e \cdot E}{m_e} \cdot t^2 \\ y = 0 \end{pmatrix}$$

3. a. On connaît la position de l'électron en B :

$$x_B = d = 3,00 \times 10^{-2} \text{ m.}$$

On en déduit t_B , date à laquelle il atteint la plaque B :

$$t_B = \sqrt{\frac{2m_e \cdot d}{e \cdot E}}$$

d'où :
$$v_B = \frac{e \cdot E}{m_e} \cdot t_B = \frac{e \cdot E}{m_e} \cdot \sqrt{\frac{2m_e \cdot d}{e \cdot E}}$$

$$v_B = \sqrt{\frac{2e \cdot E \cdot d}{m_e}}$$

b. AN:
$$v_B = \sqrt{\frac{2 \times 1,60 \times 10^{-19} \times 6,00 \times 10^4 \times 3,00 \times 10^{-2}}{9,11 \times 10^{-31}}}$$

$$v_B = 2,51 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

18 Neptune et Galatée

1. a. Pour Galatée : $Q = 5,79 \times 10^{-15} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$.

b. L'incertitude est :

$$\frac{U(Q)}{Q} = \sqrt{\left(\frac{2U(T)}{T}\right)^2 + \left(\frac{3U(a)}{a}\right)^2}$$

$$\frac{U(Q)}{Q} = \sqrt{\left(\frac{2 \times 0,001}{0,429}\right)^2 + \left(\frac{3 \times 0,01}{6,19}\right)^2}$$

$$\frac{U(Q)}{Q} = 6,72 \times 10^{-3}$$

$$U(Q) = 4 \times 10^{-17} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}.$$

c. Encadrement de la valeur Q :

$$5,75 \times 10^{-15} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3} < Q < 5,83 \times 10^{-15} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}.$$

2. a. Pour Neptune : $Q' = 5,80 \times 10^{-15} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$.

b. $U(Q') = 6 \times 10^{-17} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$.

c. Encadrement de la valeur Q' :

$$5,74 \times 10^{-15} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3} < Q' < 5,86 \times 10^{-15} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$$

3. Les intervalles calculés pour Q et Q' se recoupent.

On peut écrire :

$$Q = Q', \text{ soit } \frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_N}$$

La troisième loi de Kepler est bien vérifiée.

19 Kepler third law

Traduction du texte :

« La troisième loi de Kepler est extrêmement importante pour les astronomes.

Parce qu'elle met en jeu la masse, elle permet aux astronomes de calculer la masse de n'importe quel objet astronomique ayant un satellite.

Les astronomes déterminent les masses de tous les objets astronomiques en appliquant la troisième loi de Kepler à leurs orbites.

Ils calculent la masse du Soleil en étudiant les orbites des planètes. Ils calculent la masse des planètes en étudiant les orbites de leurs lunes.

Si les lunes n'ont pas de satellites, pour calculer leur masse, les astronomes doivent envoyer une sonde (satellite artificiel) qui sera soumise à leur champ de gravitation. »

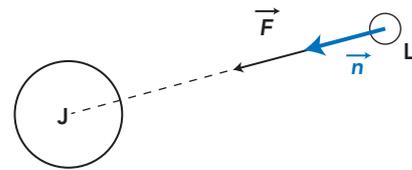
1. a. Le carré de la période de révolution T d'une planète autour du Soleil est proportionnel au cube du demi-grand axe a de son orbite elliptique :

$$\frac{T^2}{a^3} = \text{cte}$$

b. Cette loi a permis de déterminer les masses des étoiles à partir de l'étude des orbites des planètes et la masse des planètes à partir de l'étude des orbites de leurs « lunes ».

c. Si l'objet céleste n'a pas de satellite, il faut envoyer une sonde orbiter autour de lui. Les mesures de la période de révolution et de son rayon de trajectoire permettront de déterminer la masse du corps céleste.

2. a. Le système {lune} de masse m est soumis, en première approximation, à une unique force d'attraction gravitationnelle exercée par Jupiter.



On applique la deuxième loi de Newton à la Lune :

$$m \cdot \vec{a} = \vec{F} = G \cdot \frac{m \cdot M}{R^2} \cdot \vec{n}$$

soit :

$$\vec{a} = \frac{G \cdot M}{R^2} \cdot \vec{n}$$

En identifiant cette expression à $\vec{a} = \frac{dv}{dt} \cdot \vec{t} + \frac{v^2}{r} \cdot \vec{n}$, on en déduit :

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = 0 \\ \frac{v^2}{R} = \frac{G \cdot M}{R^2} \end{cases}$$

Par suite :

$$v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{R}}$$

La période de révolution T de la lune est la durée pendant laquelle elle effectue un tour (distance parcourue = $2\pi \cdot R$). Sa vitesse est donc $v = \frac{2\pi \cdot R}{T}$ (1)

soit :

$$T = \frac{2\pi \cdot R}{v}$$

On élève au carré, puis on remplace v^2 par l'expression (1) :

$$\frac{T^2}{4\pi^2} = \frac{R^3}{G \cdot M}$$

On retrouve ainsi la troisième loi de Kepler :

$$\frac{T^2}{R^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M} = \text{cte} \quad \text{d'où } M = \frac{4\pi^2 \cdot R^3}{G \cdot T^2}$$

b.
$$G = \frac{4\pi^2 \cdot R^3}{M \cdot T^2}$$

Grandeur	Unité
R^3	m^3
M	kg
T^2	s^2
$4\pi^2$	Sans unité
$G = \frac{4\pi^2 \cdot R^3}{M \cdot T^2}$	$\frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2} \Leftrightarrow \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$

La constante universelle de gravitation a pour unité $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$.

3. et 4.

	T	R	M
Io	1,8 J = 155 520 s	4,5 × 10 ⁵ km	1,6 × 10 ²⁷ kg
Ganymède	7,0 J = 604 800 s	1,1 × 10 ⁶ km	2,2 × 10 ²⁷ kg
Europe	3,5 J = 302 400 s	7 × 10 ⁵ km	2,2 × 10 ²⁷ kg
Callisto	16,5 J = 1 425 600 s	2 × 10 ⁶ km	2,3 × 10 ²⁷ kg

Moyenne : 2,0 × 10²⁷ kg.

Valeur théorique : 1,90 × 10²⁷ kg.

20 Poids ou force électrostatique

1. a. $\vec{F}_e = -e \cdot \vec{E}$

b. $F_e = e \cdot E$

$F = 1,6 \times 10^{-19} \times 50\,000 = 8,0 \times 10^{-15} \text{ N}$

2. a. $\vec{P}_e = m_e \cdot \vec{g}$

b. $P_e = m_e \cdot g$

$P_e = 9,1 \times 10^{-31} \times 10 = 9,1 \times 10^{-30} \text{ N}$

3. a. $\frac{P_e}{F_e} = \frac{9,1 \times 10^{-30}}{8,0 \times 10^{-15}} \approx 1 \times 10^{-15}$

$P_e < \frac{F_e}{100}$, on peut donc négliger le poids de l'électron devant la force électrostatique.

b. La déviation des électrons est due à la force électrostatique.

Pour aller plus loin

21 De l'optique avec des électrons!

1. Système : {électron}, noté M.

Référentiel d'étude : référentiel terrestre considéré galiléen.

Repère spatial (O; \vec{i} , \vec{k}) avec \vec{i} vers la droite.

Inventaire des forces : force électrostatique :

$\vec{F} = -e \cdot \vec{E}$. Elle est verticale descendante.

La deuxième loi de Newton donne $\vec{a} = -\frac{e \cdot \vec{E}}{m}$

Les coordonnées du vecteur accélération sont :

$$\vec{a} \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{e \cdot E}{m} \end{pmatrix}$$

Par intégration, sachant qu'à t = 0, on a :

$$\vec{v}_1 \begin{pmatrix} v_1 \cdot \sin i_1 \\ v_1 \cdot \cos i_1 \end{pmatrix}$$

on obtient les coordonnées du vecteur vitesse de l'électron :

$$\vec{v} \begin{pmatrix} v_1 \cdot \sin i_1 \\ -\frac{e \cdot E}{m} \cdot t + v_1 \cdot \cos i_1 \end{pmatrix}$$

Par intégration, sachant qu'à t = 0, on a :

$$\vec{OM}_0 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

on obtient les coordonnées du vecteur position de l'électron ou les équations horaires de son mouvement :

$$\vec{OM} \begin{pmatrix} x = v_1 \cdot \sin i_1 \cdot t \\ z = -\frac{e \cdot E}{2m} \cdot t^2 + v_1 \cdot \cos i_1 \cdot t \end{pmatrix}$$

2. De la première équation, on obtient t :

$$t = \frac{x}{v_1 \cdot \sin i_1}$$

La seconde devient :

$$z(x) = -\frac{e \cdot E}{2m \cdot (v_1 \cdot \sin i_1)^2} \cdot x^2 + \frac{1}{\tan i_1} \cdot x$$

C'est l'équation de la trajectoire de l'électron.

3. a. La trajectoire de l'électron est parabolique.

b. Au sommet S, le vecteur vitesse, tangent à la trajectoire, a une composante verticale nulle.

c. D'après la question précédente, on a :

$$\vec{v}_S \begin{pmatrix} v_{Sx} = v_1 \cdot \sin i_1 \\ v_{Sz} = -\frac{e \cdot E}{m} \cdot t_S + v_1 \cdot \cos i_1 = 0 \end{pmatrix}$$

d. $v_{Sz} = -\frac{e \cdot E}{m} \cdot t_S + v_1 \cdot \cos i_1 = 0,$

soit : $t_S = \frac{m \cdot v_1 \cdot \cos i_1}{e \cdot E}$

e. En utilisant l'expression de l'équation horaire de la question 1, on peut écrire :

$$z_S = -\frac{e \cdot E}{2m} \cdot t_S^2 + v_1 \cdot \cos i_1 \cdot t_S$$

En remplaçant t_S par son expression :

$$z_S = -\frac{e \cdot E}{2m} \cdot \left(\frac{m \cdot v_1 \cdot \cos i_1}{e \cdot E}\right)^2 + v_1 \cdot \cos i_1 \cdot \frac{m \cdot v_1 \cdot \cos i_1}{e \cdot E}$$

$$z_S = \frac{m \cdot (v_1 \cdot \cos i_1)^2}{e \cdot E} \times \left(1 - \frac{1}{2}\right) = \frac{m \cdot (v_1 \cdot \cos i_1)^2}{2e \cdot E}$$

4. L'électron atteint la zone supérieure à condition que la cote du sommet de sa trajectoire soit supérieure ou égale à d, ce qui entraîne :

$$\frac{m(v_1 \cdot \cos i_1)^2}{2e \cdot E} \geq d$$

soit : $E \leq \frac{m \cdot (v_1 \cdot \cos i_1)^2}{2e \cdot d}$

Il faut que la valeur du champ E ne soit pas trop grande pour que l'électron puisse sortir au-dessus de la grille supérieure.

5. a. Maintenant, l'électron n'est plus soumis à aucune force (son poids est négligeable par hypothèse), donc, d'après la première loi de Newton, l'électron est en mouvement rectiligne uniforme.

b. Au point de sortie, qui appartient à la trajectoire parabolique, toutes les équations des questions 1 et 2 sont vérifiées. En particulier, la vitesse horizontale s'exprime par v₁ · sin i₁.

De plus :

$$\sin i_2 = \frac{v_1 \cdot \sin i_1}{v_2}$$

c. Après les grilles, la trajectoire de l'électron est rectiligne. L'électron est dévié à la traversée du dispositif. Les angles d'incidence et d'émergence vérifient la relation :

$$v_1 \cdot \sin i_1 = v_2 \cdot \sin i_2$$

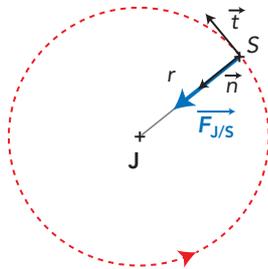
Cette relation est analogue à la loi de Snell-Descartes de la réfraction de la lumière. On peut donc dire que le faisceau d'électrons est réfracté par ce dispositif.

22 Quelle est la masse de Jupiter ?

1. a. La force de gravitation exercée par Jupiter de masse M sur le satellite de masse m est :

$$\vec{F}_{J/S} = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2} \cdot \vec{n}$$

b. Schématisation de la force $\vec{F}_{J/S}$:



2. Système : {satellite} et référentiel jupitocentrique.

Bilan des forces extérieures s'exerçant sur le satellite : la force $\vec{F}_{J/S}$ de gravitation exercée par Jupiter. L'application de la deuxième loi de Newton conduit à :

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{J/S}}{m}$$

Il vient :

$$\vec{a} = \frac{G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}}{m} \cdot \vec{n}$$

$$\vec{a} = \frac{G \cdot M}{r^2} \cdot \vec{n}$$

En identifiant cette expression à $\vec{a} = \frac{dv}{dt} \cdot \vec{t} + \frac{v^2}{r} \cdot \vec{n}$, on en déduit :

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = 0 \\ \frac{v^2}{r} = \frac{G \cdot M}{r^2} \end{cases}$$

L'égalité $\frac{dv}{dt} = 0$ entraîne que la valeur de la vitesse v du satellite est constante. Ce mouvement circulaire est donc uniforme et $v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}}$.

3. La valeur de la vitesse du satellite est indépendante de sa masse et elle est d'autant plus grande que le rayon de l'orbite est petit. Le satellite le plus rapide est celui qui est le plus proche de Jupiter.

4. La période de révolution est la durée mise par le satellite pour décrire sa trajectoire circulaire à la vitesse de valeur v constante :

$$2\pi r = v \cdot T$$

$$\text{soit : } T = \frac{2\pi \cdot r}{v} = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{G \cdot M}}$$

5. a. La représentation graphique proposée est une droite passant par l'origine, donc le carré de la période est proportionnel au cube de la distance entre les centres, soit $T^2 = k \cdot r^3$, k étant le coefficient directeur de la droite.

On retrouve la troisième loi de Kepler dans le cas d'un mouvement circulaire : $\frac{T^2}{r^3} = \text{cte.}$

b. Le résultat de la question 4 permet d'écrire :

$$\frac{T^2}{4\pi^2} = \frac{r^3}{G \cdot M} \quad \text{ou} \quad T^2 = 4\pi^2 \frac{r^3}{G \cdot M}$$

En comparant avec le résultat de la question 5a, il

$$\text{vient : } k = \frac{4\pi^2}{G \cdot M}$$

$$\text{soit : } M = \frac{4\pi^2}{G \cdot k}$$

$$M = \frac{4\pi^2}{6,67 \times 10^{-11} \times 3,1 \times 10^{-16}}$$

$$M = 1,9 \times 10^{27} \text{ kg.}$$

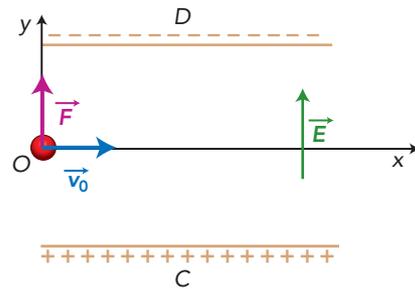
23 Particule alpha dans un champ électrostatique uniforme

1. La particule α est un noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$. Elle est constituée de 2 protons et de 2 neutrons. Elle est donc chargée positivement.

$$q = 2e, \text{ soit } q = 3,2 \times 10^{-19} \text{ C.}$$

2. Pour être déviée vers le haut la particule doit être attirée par la plaque C qui doit être négative, et repoussée par la plaque D qui doit être positive.

3. Le champ électrostatique \vec{E} est perpendiculaire aux armatures et orienté de l'armature chargée positivement vers l'armature chargée négativement. La force électrostatique $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$, avec $q > 0$ C, est colinéaire et de même sens que \vec{E} .



4. Système : {particule α } de masse m_α . Référentiel terrestre supposé galiléen. Repère : (O; x, y).

Bilan des forces extérieures : force électrostatique \vec{F} . D'après la deuxième loi de Newton :

$$\vec{F} = m_\alpha \cdot \vec{a}$$

$$\text{Or : } \vec{F} = q \cdot \vec{E}, \text{ avec } E = \frac{U}{d}$$

$$\text{d'où : } \vec{a} \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = \frac{q \cdot U}{m_\alpha \cdot d} \end{cases}$$

Par intégration, sachant que $\vec{v}_0 \begin{pmatrix} v_{x0} = v_0 \\ v_{y0} = 0 \end{pmatrix}$:

$$\vec{v} \begin{pmatrix} v_x = v_0 \\ v_y = \frac{q \cdot U}{m_\alpha \cdot d} \cdot t \end{pmatrix}$$

Par intégration, sachant qu'à $t = 0$ la particule est en O, on obtient les équations horaires de la particule α :

$$\vec{OG} \begin{pmatrix} x = v_0 \cdot t \\ y = \frac{1}{2} \frac{q \cdot U}{m_\alpha \cdot d} \cdot t^2 \end{pmatrix}$$

En éliminant t , on obtient l'équation de la trajectoire :

$$y = \frac{1}{2} \frac{q \cdot U}{m_\alpha \cdot d \cdot v_0^2} x^2$$

5. a. Lorsque la particule sort au point S, $x = \ell$:

$$y = \frac{1}{2} \frac{2e \cdot U}{m_\alpha \cdot d \cdot v_0^2} \ell^2$$

$$U = \frac{m_\alpha \cdot d \cdot v_0^2 \cdot y}{e \cdot \ell^2}$$

b.

$$U = \frac{6,64 \times 10^{-27} \times 4,00 \times 10^{-2} \times (5,00 \times 10^5)^2 \times 1,00 \times 10^{-2}}{1,60 \times 10^{-19} \times (5,00 \times 10^{-2})^2}$$

$$U_{CD} = 1,66 \times 10^3 \text{ V}$$

24 Le hockey sur gazon

1. Le mouvement de la balle est étudié dans le référentiel terrestre supposé galiléen associé au repère $(O; x, z)$.

Coordonnées du vecteur \vec{v}_B à $t = 0$ s :

$$\begin{pmatrix} v_{Bx} = v_B \cdot \cos \alpha \\ v_{Bz} = v_B \cdot \sin \alpha \end{pmatrix}$$

2. Coordonnées du vecteur position à $t = 0$ s :

$$\vec{OG} \begin{pmatrix} x_B = 0 \\ z_B = h \end{pmatrix}$$

3. La balle n'est soumise qu'à son poids, donc d'après la deuxième loi de Newton :

$$\vec{a} = \vec{g}$$

Par projection dans le repère $(O; x, z)$, on obtient :

$$\vec{a} \begin{pmatrix} a_x = 0 \\ a_z = -g \end{pmatrix}$$

Par intégration, étant donné les conditions initiales :

$$\vec{v} \begin{pmatrix} v_x = v_B \cdot \cos \alpha \\ v_z = -g \cdot t + v_B \cdot \sin \alpha \end{pmatrix}$$

4. Quel que soit le point de la trajectoire, les coordonnées du vecteur vitesse en ce point sont :

$$\vec{v} \begin{pmatrix} v_x = v_B \cdot \cos \alpha \\ v_z = -g \cdot t + v_B \cdot \sin \alpha \end{pmatrix}$$

La coordonnée horizontale du vecteur vitesse, $v_x = v_B \cdot \cos \alpha$, est une constante qui ne dépend pas de la position du point G.

Au sommet S de la trajectoire, le vecteur vitesse de la balle est horizontal, donc $v_{Sz} = 0$.

La norme du vecteur vitesse au point S est alors :

$$v_S = \sqrt{v_{xS}^2 + v_{zS}^2} = v_{xS} = v_B \cdot \cos \alpha$$

Ainsi $v_S = v_B \cdot \cos \alpha = 14,0 \times \cos(30)$

$$v_S = 12,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

5. $\vec{v} = \frac{d\vec{OG}}{dt}$

Par intégration, et en tenant compte des conditions initiales $x(0) = x_B = 0$ et $z(0) = z_B = h$, on obtient :

$$\vec{OG} \begin{pmatrix} x = v_B \cdot \cos \alpha \cdot t + x_B \\ z = -\frac{1}{2} g \cdot t^2 + v_B \cdot \sin \alpha \cdot t + z_B \end{pmatrix}$$

soit : $\vec{OG} \begin{pmatrix} x = v_B \cdot \cos \alpha \cdot t \\ z = -\frac{1}{2} g \cdot t^2 + v_B \cdot \sin \alpha \cdot t + h \end{pmatrix}$

6. Équation de la trajectoire : on isole le temps « t » de la première équation que l'on reporte dans l'expression de z :

$$t = \frac{x}{v_B \cdot \cos \alpha}$$

donc :

$$z = -\frac{1}{2} g \cdot \left(\frac{x}{v_B \cdot \cos \alpha} \right)^2 + (v_B \cdot \sin \alpha) \cdot \frac{x}{v_B \cdot \cos \alpha} + h$$

Finalement :

$$z = -\frac{1}{2} g \cdot \left(\frac{x}{v_B \cdot \cos \alpha} \right)^2 + \tan \alpha \cdot x + h$$

C'est une équation de parabole.

7. Pour que le but soit marqué, il faut, pour $x = d$, que $0 \leq z(d) \leq L$.

Pour $x = d = 15$ m :

$$z(d) = -\frac{1}{2} g \cdot \left(\frac{d}{v_B \cdot \cos \alpha} \right)^2 + \tan \alpha \cdot d + h$$

$$z(d) = -\frac{1}{2} \times 9,8 \times \left(\frac{15,0}{14,0 \times \cos 30} \right)^2 + \tan 30 \times 15,0 + 0,40$$

$$z(d) = 1,6 \text{ m.}$$

On a donc bien $0 \leq z(d) \leq L$, avec $L = 2,14$ m.

Le but est marqué.

25 Le cercle des planètes disparues

1. Le carré de la période de révolution T d'une planète autour du Soleil est proportionnel au cube du demi-grand axe a de l'orbite elliptique : $\frac{T^2}{a^3} = \text{cte}$.

2. On applique la troisième loi de Kepler à Pluton et Éris évoluant autour du Soleil :

$$\frac{T_E^2}{a_E^3} = \frac{T_P^2}{a_P^3}$$

soit : $\frac{T_E^2}{T_P^2} = \frac{a_E^3}{a_P^3}$

Or : $T_E (= 557 \text{ ans}) > T_P (= 248 \text{ ans})$

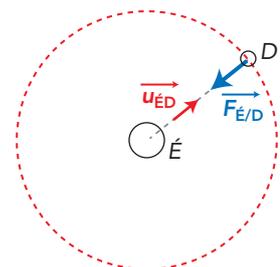
donc : $\frac{T_E^2}{T_P^2} > 1$

alors : $\frac{a_E^3}{a_P^3} > 1$ ou $a_E^3 > a_P^3$

$a_E > a_P$: l'orbite d'Éris se situe au-delà de celle de Pluton.

3. On utilisera un référentiel dont le centre est confondu avec le centre de gravité d'Éris et dont les axes sont dirigés vers trois étoiles lointaines supposées fixes. On pourrait parler de référentiel « ériscentrique ». Ce référentiel est considéré comme galiléen.

4. a. On considère le mouvement circulaire uniforme de Dysnomia dans le référentiel « ériscentrique ». Le satellite Dysnomia est soumis, en première approximation, à une unique force d'attraction gravitationnelle exercée par Éris, $\vec{F}_{E/D}$.



On applique la deuxième loi de Newton à Dysnomia, M_D étant constante :

$$\vec{F}_{E/D} = M_D \cdot \vec{a}$$

$$M_D \cdot \vec{a} = -G \cdot \frac{M_E \cdot M_D}{R_D^2} \cdot \vec{u}_{ED}$$

d'où :
$$\vec{a} = -G \cdot \frac{M_E}{R_D^2} \cdot \vec{u}_{ED}$$

b. Le vecteur accélération est porté par le rayon de la trajectoire (il est **radial**) et est orienté vers le centre de la trajectoire (il est **centripète**).

5. a. La période de révolution T_D de Dysnomia est la durée pendant laquelle Dysnomia effectue un tour (distance parcourue : $2\pi \cdot R_D$).

Sa vitesse est $v = \frac{2\pi \cdot R_D}{T_D}$

Soit :
$$T_D = \frac{2\pi \cdot R_D}{v} \quad (1)$$

Le mouvement de Dysnomia est circulaire et uniforme, l'accélération est centripète, de valeur :

$$a = \frac{v^2}{R_D}$$

En comparant avec l'expression de la question 4a :

$$\frac{v^2}{R_D} = G \cdot \frac{M_E}{R_D^2}$$

soit :
$$v = \sqrt{\frac{G \cdot M_E}{R_D}}$$

En reportant dans l'expression (1), on obtient :

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{R_D^3}{G \cdot M_E}}$$

En élevant cette relation au carré, on retrouve la troisième loi de Kepler :

$$\frac{T_D^2}{R_D^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M_E} = \text{cte}$$

car G et M_E sont constantes.

b. D'après la troisième loi de Kepler, on a :

$$G \cdot M_E = \frac{4\pi^2 \cdot R_D^3}{T_D^2}$$

soit :
$$M_E = \frac{4\pi^2 \cdot R_D^3}{G \cdot T_D^2}$$

$$M_E = \frac{4\pi^2 \times (3,60 \times 10^7)^3}{6,67 \times 10^{-11} \times (1,30 \times 10^6)^2} = 1,63 \times 10^{22} \text{ kg.}$$

6.
$$\frac{M_E}{M_P} = \frac{1,63 \times 10^{22}}{1,3 \times 10^{22}} = 1,24$$

La masse d'Éris est un peu plus grande que celle de Pluton.

Si Éris n'est pas considérée comme une planète, alors Pluton, qui a une masse moins importante que celle d'Éris, ne l'est pas non plus. Éris et Pluton sont en fait des représentants des « planètes naines ».

26 Principe de la spectrométrie de masse

1. Les cations sont soumis à la force électrostatique $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$, avec $q > 0$. D'après la deuxième loi de Newton, cette force est colinéaire à l'accélération et de même sens. Pour accélérer les ions, il faut que vitesse et accélération soient dans le même sens, ici

celui de \vec{i} , donc il faut orienter \vec{E} dans la direction et le sens de $\vec{PP'}$.

2. a. Un mouvement circulaire uniforme est un mouvement de trajectoire circulaire et de valeur de vitesse constante (l'accélération est alors centripète).

b.
$$\vec{a}_i = \frac{dv_i}{dt} \cdot \vec{t} + \frac{v_i^2}{R_i} \cdot \vec{n}$$

c. À partir des informations de l'énoncé, on applique la deuxième loi de Newton à l'ion i de masse constante, soumis à la force de Lorentz dans le référentiel terrestre galiléen. Or :

$$\vec{a}_i = \frac{q_i \cdot v_i \cdot B}{m_i} \cdot \vec{n}$$

Cela permet d'écrire :

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = 0 \\ \frac{v_i^2}{R_i} = \frac{q_i \cdot v_i \cdot B}{m_i} \end{cases}$$

Remarque : la première égalité montre effectivement que le mouvement est uniforme.

De la deuxième égalité, il vient : $R_i = \frac{m_i \cdot v_i}{B \cdot q_i}$

d. Le rayon de la trajectoire peut aussi s'écrire, compte tenu des expressions des valeurs des vitesses initiales :

$$R_i = \sqrt{\frac{2m_i \cdot E \cdot d}{q_i \cdot B^2}}$$

Le rayon dépend donc de la masse et de la charge de l'ion. Chaque ion aura sa propre trajectoire circulaire, il sera possible de les séparer en fonction de leur masse et de leur charge.

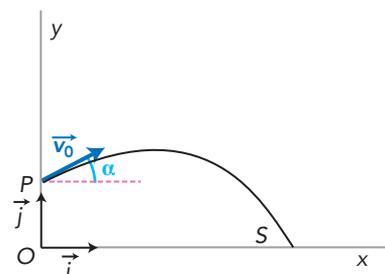
3. Les ions sont des systèmes isolés, une fois sortis de la chambre de déviation. On prévoit donc un mouvement rectiligne uniforme d'après la première loi de Newton.

4. En ionisant l'uranium, on obtient des ions isotopes (235 et 238). Ils possèdent la même charge mais des masses différentes. Il est donc possible de les séparer ou de découvrir de nouveaux isotopes (il y en a autant que de trajectoires observées dans la chambre de déviation).

27 Un record qui tient toujours

1. La trajectoire d'un mouvement rectiligne uniformément accéléré est une droite; les vecteurs vitesse et accélération du système sont colinéaires et de même sens; la valeur du vecteur accélération est constante.

2. a.



\vec{v}_0 est la vitesse initiale du sauteur, le point O correspond à son point d'appui.

b. Système : P, centre de gravité du sauteur.
Référentiel d'étude : référentiel terrestre considéré galiléen.

Repère $(O; x, y)$ avec l'axe horizontal orienté vers la droite et l'axe vertical vers le haut.

Inventaire des forces extérieures : le poids.

D'après la deuxième loi de Newton :

$$\vec{a} = \vec{g}$$

$$\vec{a} \begin{pmatrix} 0 \\ -g \end{pmatrix}$$

En calculant une primitive temporelle de chacune des coordonnées du vecteur accélération et en tenant compte de la vitesse initiale du sauteur :

$$\vec{v}_0 \begin{pmatrix} v_0 \cdot \cos \alpha \\ -g \cdot t + v_0 \cdot \sin \alpha \end{pmatrix}$$

On en déduit le vecteur position, sachant qu'à l'instant initial, le sauteur est à l'abscisse $x = 0$ et que son centre de gravité se situe à l'ordonnée $z = h$.

$$\vec{OG} \begin{pmatrix} x = v_0 \cdot \cos \alpha \cdot t \\ y = -\frac{1}{2}g \cdot t^2 + v_0 \cdot \sin \alpha \cdot t + h \end{pmatrix}$$

On élimine le temps en combinant ces équations horaires pour obtenir l'équation de la trajectoire :

$$t = \frac{x}{v_0 \cdot \cos \alpha}$$

$$y = -\frac{1}{2} \cdot \frac{g}{(v_0 \cdot \cos \alpha)^2} \cdot x^2 + \tan \alpha \cdot x + h$$

3. a. La longueur ℓ du saut correspond à l'abscisse de P lorsque $y(P) = 0$.

On doit résoudre :

$$0 = -\frac{1}{2} \cdot \frac{g}{(v_0 \cdot \cos \alpha)^2} \cdot \ell^2 + \tan \alpha \cdot \ell + h$$

Les solutions sont :

$$\ell_1 = \frac{-\tan \alpha + \sqrt{\tan^2 \alpha + \frac{2g \cdot h}{(v_0 \cdot \cos \alpha)^2}}}{-\frac{g}{(v_0 \cdot \cos \alpha)^2}}$$

et
$$\ell_2 = \frac{-\tan \alpha - \sqrt{\tan^2 \alpha + \frac{2g \cdot h}{(v_0 \cdot \cos \alpha)^2}}}{-\frac{g}{(v_0 \cdot \cos \alpha)^2}}$$

On ne garde que la solution positive, ℓ_2 , physiquement acceptable.

b. La longueur est $\ell_2 = 12,5$ m.

c. La longueur est surestimée par ce modèle : les forces de frottement de l'air ne peuvent être négligées, le sauteur ne peut pas tout à fait être modélisé par son centre de gravité.

4. On exploite une vidéo (prise de côté, dans le plan de la trajectoire, le sautoir peut servir d'étalon de longueur), on repère la position de G à intervalles (courts) de temps réguliers et à partir de $x(t)$ et $y(t)$, on calcule dans un tableur $v(t)$, $a(t)$ et on trace la trajectoire de G .

Retour sur l'ouverture du chapitre

28 Halley la Bleue!

1. « En tenant compte de l'attraction gravitationnelle de Jupiter et de Saturne, » J. LALANDE et A. C. CLAIRAULT ont affirmé que la comète réapparaîtrait à une certaine date, ce qui a effectivement eu lieu. Leur prévision a donc permis de valider les lois de la mécanique newtonienne.

2. Première loi de Kepler : loi des orbites

Dans le référentiel héliocentrique, la trajectoire du centre de gravité d'une planète est une ellipse dont le centre de gravité du Soleil est l'un des foyers.

Deuxième loi de Kepler : loi des aires

Le segment de droite reliant les centres de gravité du Soleil et de la planète balaie des aires égales pendant des durées égales.

Troisième loi de Kepler : loi des périodes

Pour toutes les planètes du système solaire, le rapport entre le carré de la période de révolution T et le cube de la longueur a du demi-grand axe est égal à une même constante :

$$\frac{T^2}{a^3} = \text{cte}$$

3. La nature elliptique de la trajectoire illustre la première loi (avec le Soleil au foyer).

4. a. D'après le texte, la période de révolution T de la comète est peu différente de 76 ans.

b.

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{(76 \times 365 \times 24 \times 3600)^2}{(17,9 \times 1,50 \times 10^{11})^3} = 3,0 \times 10^{-19} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$$

La trajectoire de la comète de Halley n'est pas circulaire, mais la constante de Kepler a la même valeur pour le mouvement d'un astre autour du Soleil pour une trajectoire elliptique ou circulaire. Son expression a été établie dans le cours (p. 167 du manuel) et vaut :

$$\frac{4\pi^2}{G \cdot M_S} = 3,0 \times 10^{-19} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$$

La troisième loi de Kepler est bien vérifiée.

Comprendre un énoncé

29 Pesantier martienne

1. a. $g_M = \frac{G \cdot M_M}{R_M^2} = \frac{G \cdot M_T}{10 \cdot R_M^2}$

b. $g_M = 3,46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

$$g_T = \frac{G \cdot M_T}{R_T^2} = 9,77 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\frac{g_T}{g_M} = \frac{9,77}{3,46} = 2,82$$

2. a. Les coordonnées du vecteur position \vec{OG} sont :

$$\vec{OG} \begin{pmatrix} x_M = v_0 \cdot \cos \alpha \cdot t \\ y_M = -\frac{1}{2}g_M \cdot t^2 + v_0 \cdot \sin \alpha \cdot t \end{pmatrix}$$

b. En éliminant le temps :

$$y_M = -\frac{1}{2} \frac{g_M}{(v_0 \cdot \cos \alpha)^2} \cdot x_M^2 + \tan \alpha \cdot x_M$$

3. a. Sur Terre :

$$y_M = -\frac{1}{2} \frac{g_T}{(v_0 \cdot \cos \alpha)^2} \cdot x^2 + \tan \alpha \cdot x$$

b. La longueur du saut est l'abscisse non nulle pour laquelle $y_M(x_M)$ s'annule :

$$\frac{g_M}{2(v_0 \cdot \cos \alpha)^2} \cdot x_M = \tan \alpha$$

$$x_M = \frac{2(v_0 \cdot \cos \alpha)^2}{g_M} \cdot \tan \alpha$$

Sur Terre :

$$x_T = \frac{2(v_0 \cdot \cos \alpha)^2}{g_T} \cdot \tan \alpha$$

$$\frac{x_M}{x_T} = \frac{g_T}{g_M} = 2,82$$

Le saut martien sera presque trois fois plus long que sur la Terre.

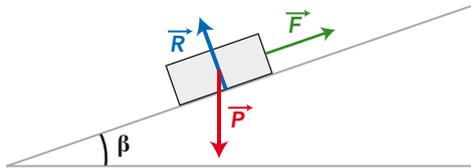
4. Le cœur continuera de fonctionner comme sur la Terre. Le sang éjecté restera plus dans la partie haute du corps, car la pesanteur est moins forte, d'où une suralimentation des parties supérieures.

Travail et énergie

Activités

1 Travail d'une force (p. 184)

1 Le bloc de pierre est soumis à son poids, \vec{P} , à la force exercée par les Égyptiens, \vec{F} , et à la réaction verticale exercée par la rampe, \vec{R} . Dans le texte, il est dit que les « rampes sont enduites de boues humides » ; on peut donc négliger les frottements.



2 Le bloc de pierre étant immobile, son énergie cinétique est nulle. Entre les deux positions, le bloc de pierre a changé d'altitude, son énergie potentielle de pesanteur a varié.

Cette variation est la conséquence de l'action des forces exercées par les ouvriers.

3 a. La force \vec{A} permet de tirer le bloc vers le bas de la rampe ; la force \vec{B} permet de tirer le bloc vers le sommet de la rampe ; la force \vec{C} déplace le bloc latéralement ; la force \vec{D} permet de pousser le bloc vers le haut de la rampe.

b. Pour être efficace, une force doit être dirigée dans le sens du mouvement.

Les forces \vec{B} et \vec{D} ont le même sens que celui du mouvement ; ce sont les plus efficaces.

La force \vec{A} , qui s'oppose au mouvement, est contre-productive ; la force \vec{C} , perpendiculaire au mouvement, n'a pas d'effet sur celui-ci.

4 Le travail a la dimension d'une énergie.

Par analogie avec l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur, $\mathcal{E}_{pp} = m \cdot g \cdot h$.

On en déduit que l'expression du travail doit être le produit de la valeur d'une force par une longueur. Le travail est donc homogène à des $N \cdot m$.

Les relations **a** et **d** ne peuvent pas convenir ; en effet, l'analyse dimensionnelle conduit à :

a. $[W_{AB}] = \frac{N}{m} = N \cdot m^{-1}$ et **d.** $[W_{AB}] = \frac{m}{N} = m \cdot N^{-1}$.

L'analyse dimensionnelle des expressions **b** et **c** montre que ces deux relations sont homogènes à des $N \cdot m$.

Le schéma du document fait apparaître que $\vec{F} \cdot \vec{AB} = F \cdot AB \cdot \cos \alpha$; la relation **c** convient.



Animation : Travail d'une force sur un objet en mouvement.

2 Potentiels et énergie potentielle dans un condensateur plan (p. 185)

Complément

Le matériel utilisé est une cuve rhéographique remplie de solution de sulfate de cuivre à la concentration de $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. La cuve rhéographique permet de simuler un condensateur plan. Les résultats présentés ici ont été obtenus avec une cuve de 12 cm.

Résultats des mesures

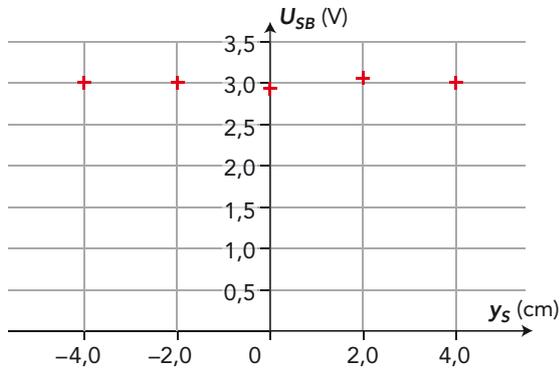
Valeur de la tension U_{SB} (en volt), pour différentes positions du point S :

$x_S \backslash y_S$	-4,0	-2,0	0,0	2,0	4,0
0,0	0,1	0,0	-0,1	0,0	0,1
2,0	1,1	1,0	0,8	1,1	1,0
4,0	2,0	1,9	2,0	1,9	2,1
6,0	3,0	3,0	2,9	3,1	3,0
8,0	4,0	4,1	4,0	3,9	4,0
10,0	5,0	4,9	5,1	5,0	5,1
12,0	6,1	6,0	5,9	6,0	6,0

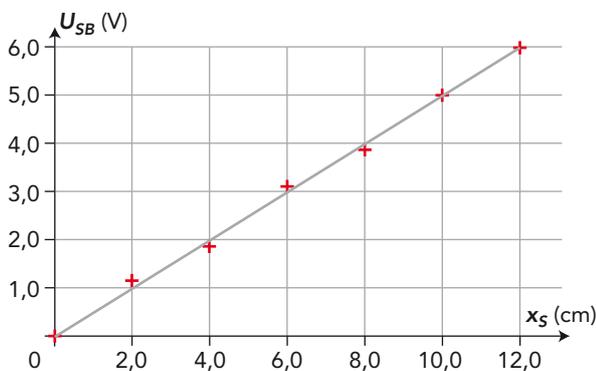
1 Le champ électrostatique est orienté perpendiculairement aux armatures et dirigé de l'armature P_A vers l'armature P_B . Si A est un point de P_A , on a :

$$E = \frac{U_{AB}}{d} = \frac{U_{PN}}{d} = \frac{6,00}{0,120} = 50,0 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}.$$

2 a. Variations de U_{SB} en fonction de y_S pour $x_S = 6,0 \text{ cm}$:



Variations de U_{SB} en fonction de x_S pour $y_S = 2,0 \text{ cm}$:



► Pour une valeur de x_S donnée, la tension U_{SB} garde quasiment la même valeur.

► Pour une valeur de y_S donnée, la tension U_{SB} augmente proportionnellement à x_S .

b. La courbe qui donne les variations de U_{SB} en fonction de x_S est une droite qui passe par l'origine, U_{SB} est donc proportionnelle à x_S ; on peut écrire $U_{SB} = k \cdot x_S$, où k est le coefficient directeur de la droite.

Graphiquement, on détermine k :

$k = 0,50 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} = 50 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$, d'où $U_{SB} = 50 \cdot x_S$.
En comparant k avec la valeur de E calculée à la question 1, on a $U_{SB} = E \cdot x_S$.

3 a. $U_{SB} = V_S - V_{B'}$ soit $V_S = U_{SB} + V_{B'}$.

Si $V_{B'} = 0 \text{ V}$:

$x_S \backslash y_S$	-4,0	-2,0	0,0	2,0	4,0
0,0	0,1	0,0	-0,1	0,0	0,1
2,0	1,1	1,0	0,8	1,1	1,0
4,0	2,0	1,9	2,0	1,9	2,1
6,0	3,0	3,0	2,9	3,1	3,0
8,0	4,0	4,1	4,0	3,9	4,0
10,0	5,0	4,9	5,1	5,0	5,1
12,0	6,1	6,0	5,9	6,0	6,0

Si $V_{B'} = -6 \text{ V}$:

$x_S \backslash y_S$	-4,0	-2,0	0,0	2,0	4,0
0,0	-5,9	-6,0	-6,1	-6,0	-5,9
2,0	-4,9	-5,0	-5,2	-4,9	-5,0
4,0	-4,0	-4,1	-4,0	-4,1	-3,9
6,0	-3,0	-3,0	-3,1	-2,9	-3,0
8,0	-2,0	-1,9	-2,0	-2,1	-2,0
10,0	-1,0	-1,1	-0,9	-1,0	-0,9
12,0	0,1	0,0	-0,1	0,0	0,0

b. La valeur du potentiel en un point dépend de la valeur de la référence choisie.

4 $W_{SB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \vec{SB} = q \cdot \vec{E} \cdot \vec{SB}$,

avec $\vec{E} \cdot \vec{SB} = -E \cdot \vec{i} \cdot (x_B - x_S) \cdot \vec{i}$

$$\vec{E} \cdot \vec{SB} = -E \cdot (x_B - x_S) = E \cdot x_S, \text{ car } x_B = 0.$$

Donc $W_{SB}(\vec{F}) = q \cdot E \cdot x_S$.

D'après le résultat de la question 2b, $U_{SB} = E \cdot x_S$,

donc : $V_S - V_B = E \cdot x_S$ soit $E = \frac{V_S - V_B}{x_S}$

En reportant dans l'expression du travail, il vient :

$$W_{SB}(\vec{F}) = q \cdot \frac{V_S - V_B}{x_S} \cdot x_S = q \cdot (V_S - V_B)$$

5 a. $W_{SB}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot (z_S - z_B) = -(\mathcal{E}_{pp}(B) - \mathcal{E}_{pp}(S))$

Le travail du poids d'un système dépend de la variation d'altitude, celui de la force électrostatique de la variation du potentiel.

On peut donc écrire :

$$W_{SB}(\vec{F}) = q \cdot (V_S - V_B) = -(\mathcal{E}_{pé}(B) - \mathcal{E}_{pé}(S))$$

$$\Delta \mathcal{E}_{pé} = \mathcal{E}_{pé}(B) - \mathcal{E}_{pé}(S) = -q \cdot (V_S - V_B) = q \cdot (V_B - V_S)$$

b. Si on choisit le point B comme référence des potentiels, $V_B = 0$ et $\mathcal{E}_{pé}(B) = 0$.

On a donc : $\mathcal{E}_{pé}(S) = q \cdot V_S$.

3 Tic-tac, « tactique » de mesure du temps (p. 186)

1 L'oscillation d'un pendule est un phénomène qui se répète identique à lui-même dans le temps; on peut le qualifier de périodique.

2 Pour mesurer avec la meilleure précision possible la durée d'une oscillation, c'est-à-dire la période du pendule, on peut mesurer la durée de plusieurs oscillations et en faire la moyenne.

3 On peut imaginer que la durée d'une oscillation dépend de la masse accrochée au fil, de la longueur du fil et de la valeur initiale de l'angle dont le pendule est écarté.

Pour vérifier l'influence de ces différents paramètres, on mesure la durée de 10 oscillations (afin d'améliorer la précision des mesures) pour différentes valeurs d'un des paramètres, tous les autres gardant la même valeur, et on en déduit la valeur de la période T .

► Influence de la masse m , pour $\ell = 59,5$ cm et $\theta_0 = 30^\circ$:

m (g)	100	150	200	300
T (s)	1,60	1,60	1,59	1,62

La période des oscillations du pendule est indépendante de la masse m .

► Influence de la longueur ℓ , pour $m = 100$ g et $\theta_0 = 30^\circ$:

ℓ (cm)	14	32	42	79
T (s)	0,84	1,20	1,37	1,85

La période des oscillations dépend de la longueur ℓ du pendule.

► Influence de l'angle θ_0 , pour $\ell = 59,5$ cm et pour $m = 100$ g :

θ_0 ($^\circ$)	10	20	30	40	60	90
T (s)	1,59	1,59	1,60	1,62	1,63	1,68

La période des oscillations ne dépend pas de θ_0 pour des petits angles.

4 D'après les résultats des mesures de la question précédente, il y a isochronisme des oscillations uniquement pour des angles θ_0 faibles (c'est-à-dire inférieurs à 30°).

5 a. Avec un pendule de longueur $\ell = 59,5$ cm auquel est suspendu un solide de masse $m = 100$ g, on mesure :

	$10T = 16,0$ s	$20T = 31,0$ s	$30T = 46,4$ s
T (s)	1,60	1,55	1,55

Dans les trois cas, la mesure de T est sensiblement la même. Cependant, lors de la mesure de $30T$, l'amplitude des oscillations décroît légèrement.

b. L'incertitude des durées mesurées au chronomètre est $U(\Delta t) = 0,2$ s; l'incertitude sur chaque période vaut donc :

$$U(T) = \frac{U(\Delta t)}{n}$$

n	10	20	30
$U(T)$ (s)	0,02	0,01	0,006

On constate que l'incertitude sur la valeur de T diminue avec le nombre d'oscillations. On retrouve donc le résultat annoncé à la question 2.

6 L'amortissement se manifeste par une diminution de l'amplitude des oscillations. Il est dû aux frottements de l'air.

7 Le pendule peut servir d'étalon de durée si la période des oscillations est invariante. Il peut alors servir à construire une horloge.

4 Étude énergétique des oscillations libres d'un pendule (p. 187)

Complément

Le matériel utilisé est un pendule associé à un dispositif d'acquisition, disponible chez la plupart des fournisseurs de matériel pédagogique.

Il n'est pas nécessaire que chaque élève fasse l'acquisition. On peut réaliser une acquisition sur le bureau du professeur, puis partager les résultats afin que chaque élève en fasse l'exploitation à l'aide d'un tableur.

Les résultats de l'acquisition obtenus avec un pendule de type *Pendulor*[®], de longueur $\ell = 44$ cm et de masse $m = 143$ g, sont donnés dans le fichier Excel « Chap7_act4_pendulor.xls », disponible sur le site www.hachette-education.fr dans le dossier « Livre du professeur : compléments ».

1 L'origine de l'axe (Oz) correspond à la position d'équilibre du pendule.

Lorsque le pendule est écarté de sa position d'équilibre :

$$z = \ell - \ell \cdot \cos \theta = \ell \cdot (1 - \cos \theta)$$

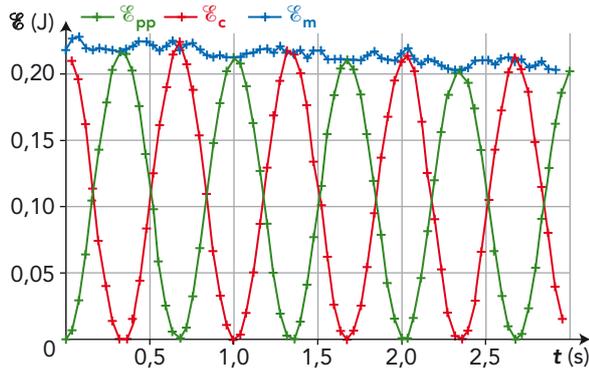
En tenant compte de l'origine de l'énergie potentielle de pesanteur :

$$\mathcal{E}_{pp} = m \cdot g \cdot z = m \cdot g \cdot \ell \cdot (1 - \cos \theta)$$

2 $v(t) = \ell \cdot \frac{d\theta}{dt}$ et $\mathcal{E}_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$

3 L'énergie mécanique vaut $\mathcal{E}_m = \mathcal{E}_c + \mathcal{E}_{pp}$.

4 Évolution des trois formes d'énergie au cours du temps :



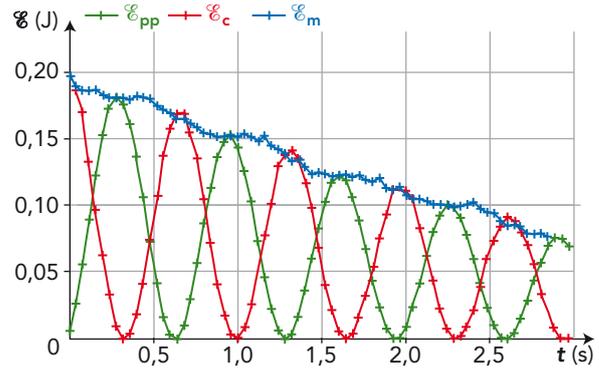
5 a. D'après le graphe, $\mathcal{E}_{pp\max} = 0,21 \text{ J}$; cette valeur correspond au pendule le plus éloigné de sa position d'équilibre.

b. Au cours d'une période d'oscillation (en partant de la position la plus éloignée de la position d'équilibre), l'énergie potentielle de pesanteur diminue, augmente, diminue de nouveau, puis augmente.

6 a. D'après le graphe, $\mathcal{E}_{c\max} = 0,21 \text{ J}$; cette valeur correspond au passage du pendule par sa position d'équilibre.

b. Au cours d'une période d'oscillation (en partant de la position la plus éloignée de la position d'équilibre), l'énergie cinétique augmente, diminue, augmente de nouveau, puis diminue.

7 Cas d'un pendule soumis à des frottements fluides :



8 a. En l'absence de frottement, l'énergie mécanique garde une valeur constante, elle se conserve. En présence de frottements, elle diminue à chaque oscillation.

b. En l'absence de frottement, l'énergie potentielle de pesanteur est intégralement transférée en énergie cinétique et inversement. En présence de frottements, il y a transfert partiel de l'énergie potentielle de pesanteur en énergie cinétique ; une partie de l'énergie est dissipée du fait des frottements.

Manuel numérique 20

Simulation : Études énergétiques des oscillations d'un pendule avec et sans frottements.

5 Mesure du temps et définition de la seconde : la quête de la précision (p. 188-189)

1 a. La rotation de la Terre, le pendule de Huygens, les transitions électroniques, etc. sont des exemples de phénomènes physiques utilisés pour définir le temps.

b. Ces phénomènes sont tous périodiques.

2 On parle de jour solaire moyen, car la seconde est définie à partir d'une valeur moyenne faite sur une année. En effet, le jour solaire, temps séparant deux passages successifs du Soleil au méridien d'un lieu, change selon la période de l'année à laquelle on se trouve, essentiellement du fait de la trajectoire elliptique de la Terre. La Terre se déplace plus vite lorsqu'elle est près du Soleil que lorsqu'elle en est éloignée, ce qui a une influence sur la durée du jour solaire qui varie entre 23h59 min 39 s et 24h0 min 30 s.

3 a. Les phénomènes dissipatifs évoqués dans les documents sont les frottements générés par l'effet des marées.

b. Les frottements entraînent un ralentissement de la vitesse de rotation de la Terre autour de son axe

et donc une diminution de son énergie cinétique. Cette perte d'énergie est traduite par le terme « dissipatif ».

c. Les phénomènes dissipatifs sont un frein à l'utilisation des systèmes mécaniques pour mesurer le temps. Ils sont à l'origine d'une perte d'énergie qui empêche ces systèmes d'évoluer de manière périodique.

4 Une horloge atomique utilise le signal délivré par un oscillateur à quartz qui oscille à une fréquence stable dans le temps.

Cette fréquence correspond à celle du rayonnement échangé par un atome de césium lors d'une transition entre deux niveaux particuliers. Le césium existant sous un seul isotope, cette fréquence est la même pour tous les atomes. Les vibrations du quartz sont donc stables dans le temps.

5 L'utilisation des horloges atomiques est limitée, car elles sont difficiles à mettre en œuvre et ont un coût élevé.

QCM

- 1** 1. C; 2. B; 3. A; 4. A et C; **2** 1. a. A; 1. b. A et C; 1. c. A; 1. d. C; 2. C; 3. C.

Application immédiate

3 Analyser des transferts énergétiques

1. L'énergie mécanique ne se conserve pas.
2. La vitesse sera plus importante en D en l'absence de frottement, car les frottements sont dissipatifs et font perdre de l'énergie mécanique au système.

4 Utiliser la conservation de l'énergie mécanique pour calculer une vitesse

$$V_A = -\frac{1}{2e} \cdot m \cdot v_B^2$$

$$V_A = -3,69 \times 10^3 \text{ V}$$

Pour commencer

5 Connaître la condition pour qu'une force travaille

Cas où une force travaille : a et c.

6 Connaître l'expression du travail d'une force

1. $W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \vec{AB} = F \cdot AB \cdot \cos \alpha$
2. $W_{AB}(\vec{F}) = 45 \times 200 \times \cos 40 = 6,9 \times 10^3 \text{ J}$

7 Établir l'expression du travail du poids

1. $W_{HE}(\vec{P}) = \vec{P} \cdot \vec{HE} = P \cdot HE \cdot \cos \alpha$
 \vec{P} et \vec{HE} sont colinéaires, donc $\cos \alpha = 1$.
2. $W_{HE}(\vec{P}) = -m \cdot g \cdot (z_E - z_H) = m \cdot g \cdot (z_H - z_E)$

8 Connaître l'expression du travail du poids

1. Pour les figures ② et ③ :

$$W_{AB}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot (z_A - z_B)$$

Pour la figure ① :

$$W_{BA}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot (z_B - z_A)$$

2. a. Pour les figures ② et ③ :

$$W_{AB}(\vec{P}) = -600 \times 9,81 \times 800 = -4,71 \times 10^6 \text{ J.}$$

Pour la figure ① :

$$W_{BA}(\vec{P}) = 600 \times 9,81 \times 800 = 4,71 \times 10^6 \text{ J.}$$

- b. Le travail est le même pour les figures ② et ③. Le travail du poids dépend seulement de l'altitude des points de départ et d'arrivée. Or, dans les figures ② et ③, les points de départ ont la même altitude et les points d'arrivée ont également la même altitude, donc le travail garde la même valeur.

Le travail dépend des points de départ et d'arrivée; ils sont différents dans le cas des figures ① et ③.

9 Calculer le travail d'une force constante

1. Le travail de la force \vec{F} au cours de l'évacuation pour un déplacement \vec{AB} ($AB = h$) s'écrit :

$$W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \vec{AB} = F \cdot h \cdot \cos(0^\circ) = F \cdot h$$

2. Système : {skieur}, référentiel terrestre.

Bilan des forces extérieures : poids, \vec{P} , et force exercée par le treuil, \vec{F} .

On peut appliquer le principe d'inertie puisque le mouvement se déroule à vitesse constante :

$$\vec{P} + \vec{F} = \vec{0}, \quad \text{soit } F = P$$

3. $W_{AB}(\vec{F}) = F \cdot h = P \cdot h = m \cdot g \cdot h$

$$W_{AB}(\vec{F}) = 80 \times 9,81 \times 5,0 = 3,9 \times 10^3 \text{ J}$$

10 Calculer le travail d'une force électrostatique

1. Le travail de la force électrique s'écrit :

$$W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \vec{AB}, \quad \text{avec } \vec{F} = q \cdot \vec{E},$$

soit : $W_{AB}(\vec{F}) = q \cdot \vec{E} \cdot \vec{AB}$

2. $W_{AB}(\vec{F}) = q \cdot \vec{E} \cdot \vec{AB} = q \cdot E \cdot AB \cdot \cos \alpha$

Soit d la distance séparant les deux armatures. On a alors :

$$E = \frac{U_{AB}}{d}, \quad \text{avec } d = AB \cdot \cos \alpha.$$

Il vient $W_{AB}(\vec{F}) = q \cdot \frac{U_{AB}}{d} \cdot d = q \cdot U_{AB}$.

3. La charge du noyau d'hélium est de $2e$.

$$W_{AB}(\vec{F}) = 2e \cdot U_{AB}$$

$$W_{AB}(\vec{F}) = 1,28 \times 10^{-16} \text{ J}$$

11 Définir une force conservative

a. Faux. Une force est conservative si son travail est indépendant du chemin suivi et ne dépend que du point de départ et du point d'arrivée.

b. Vrai. Le poids est une force conservative.

c. Faux. Les frottements sont des forces non conservatives; leur travail dépend du chemin suivi entre le point de départ et le point d'arrivée.

12 Identifier les différentes formes d'énergie

1. Le solide possède de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle de pesanteur.

Il possède par conséquent de l'énergie mécanique, somme de son énergie cinétique et de son énergie potentielle.

2. Initialement, le solide est lâché sans vitesse initiale; son énergie cinétique est donc nulle. Cela correspond à la courbe ②.

Lorsqu'il est écarté de sa position d'équilibre, son énergie potentielle de pesanteur est maximale. Cela correspond à la courbe ①.

L'énergie mécanique est la somme des deux autres énergies. Cela correspond à la courbe ③.

3. Il y a transfert partiel de l'énergie potentielle de pesanteur en énergie cinétique, puis inversement.

13 Utiliser les transferts d'énergie pour calculer une vitesse

1. $\mathcal{E}_m(A) = \mathcal{E}_c(A) + \mathcal{E}_{pp}(A)$

En choisissant le point A d'altitude $z_A = 1,50$ m comme référence de l'énergie potentielle de pesanteur :

$$\mathcal{E}_{pp}(A) = 0 \quad \text{et} \quad \mathcal{E}_m(A) = \mathcal{E}_c(A) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2$$

2. En B, $\mathcal{E}_c(B) = 0$.

$$\mathcal{E}_m(B) = \mathcal{E}_c(B) + \mathcal{E}_{pp}(B)$$

$$\mathcal{E}_m(B) = \mathcal{E}_{pp}(B) = m \cdot g \cdot (z_B - z_A)$$

3. a. L'énergie mécanique se conserve :

$$\mathcal{E}_m(A) = \mathcal{E}_m(B)$$

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2 = m \cdot g \cdot (z_B - z_A)$$

$$v_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot (z_B - z_A)} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}, \quad \text{avec } h = z_B - z_A$$

b. $v_0 = \sqrt{2 \times 9,81 \times (5,0 - 1,50)} = 8,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

14 Utiliser les transferts d'énergie pour calculer une différence de potentiel

1. L'électron est soumis à la force électrostatique, qui est une force conservative. Son énergie mécanique se conserve : $\mathcal{E}_m(A) = \mathcal{E}_m(B)$.

2. Puisque l'énergie mécanique se conserve :

$$\mathcal{E}_c(A) + \mathcal{E}_{pé}(A) = \mathcal{E}_c(B) + \mathcal{E}_{pé}(B),$$

soit : $\mathcal{E}_{pé}(B) - \mathcal{E}_{pé}(A) = -(\mathcal{E}_c(B) - \mathcal{E}_c(A))$

ou : $\Delta \mathcal{E}_{pé} = -\Delta \mathcal{E}_c$

La variation d'énergie potentielle électrique est l'opposée de la variation d'énergie cinétique.

L'électron est accéléré entre A et B, la variation d'énergie cinétique est donc positive et la variation d'énergie potentielle électrique négative.

3. Sur l'électrode A, l'énergie potentielle électrique est :

$$\mathcal{E}_{pé}(A) = q \cdot V_A = -e \cdot V_A$$

Sur l'électrode B : $\mathcal{E}_{pé}(B) = q \cdot V_B = -e \cdot V_B$

La variation d'énergie potentielle électrique s'écrit :

$$\Delta \mathcal{E}_{pé} = \mathcal{E}_{pé}(B) - \mathcal{E}_{pé}(A) = -e \cdot (V_B - V_A)$$

Elle doit être négative, donc $V_B - V_A$ doit être positive.

15 Utiliser les transferts d'énergie pour calculer la valeur d'une force

1. $\Delta \mathcal{E}_m = \Delta \mathcal{E}_c + \Delta \mathcal{E}_{pp}$

Le mouvement ayant lieu sur une route horizontale, $\Delta \mathcal{E}_{pp} = 0$.

Lorsque le véhicule s'arrête, sa vitesse devient nulle ; la variation d'énergie mécanique s'écrit :

$$\Delta \mathcal{E}_m = \Delta \mathcal{E}_c = 0 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = -\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

2. La force de freinage \vec{f} est une force non conservative :

$$\Delta \mathcal{E}_m = W_{AB}(\vec{f}) = \vec{f} \cdot \vec{AB} = -\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$$-f \cdot AB = -\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$$f = \frac{m \cdot v^2}{2AB}$$

$$f = \frac{1000 \times \left(\frac{83,5}{3,6}\right)^2}{2 \times 50,0} = 5,38 \times 10^3 \text{ N}$$

16 Mesurer le temps

1. Un oscillateur peut servir à construire une horloge si son évolution est périodique.

2. Le temps universel est basé sur la rotation de la Terre autour de son axe et le temps des éphémérides est basé sur le mouvement de la Terre autour du Soleil.

3. Le temps atomique est une échelle de temps plus précise et plus stable.

Pour s'entraîner

17 Précision d'une mesure

1. La période T des oscillations vaut $T = \frac{\Delta t}{n}$.

n	1	5	10	20
T(s)	1,3	1,24	1,27	1,29

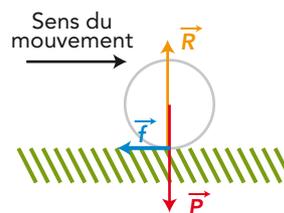
2. L'incertitude des durées mesurées au chronomètre est $U(\Delta t) = 0,2$ s ; l'incertitude sur chaque période vaut donc :

$$U(T) = \frac{U(\Delta t)}{n}$$

n	1	5	10	20
U(T)(s)	0,2	$4,0 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$

3. L'incertitude diminue lorsque le nombre d'oscillations augmente. Avec un grand nombre d'oscillations, on obtient une mesure plus précise de la période.

18 Utiliser la non-conservation de l'énergie mécanique



1. a. La balle est soumise à son poids, \vec{P} , à la réaction verticale du green, \vec{R} , et aux forces de frottements, \vec{f} .

b. Le poids et la réaction verticale du green sont des forces dont la

direction est perpendiculaire à celle du mouvement ; elles ne travaillent pas.

$$W(\vec{P}) = W(\vec{R}) = 0$$

$$W(\vec{f}) = \vec{f} \cdot \vec{\ell} = -f \cdot \ell$$

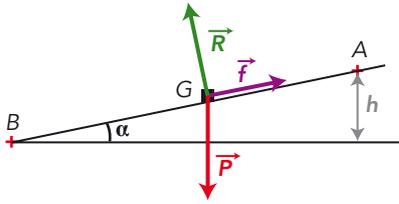
2. La balle est soumise à une force non conservative qui travaille ; son énergie mécanique ne se conserve pas et sa variation au cours du déplacement de la balle est égale au travail de cette force.

3. $\Delta \mathcal{E}_m = -\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2 = -f \cdot \ell$

$$v_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot f \cdot \ell}{m}} = 3,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

19 À chacun son rythme

1. La voiture est soumise à son poids, \vec{P} , à la réaction normale du sol, \vec{R} , et à la force de freinage, \vec{f} .



$$\begin{aligned} 2. \Delta \mathcal{E}_m &= \mathcal{E}_m(B) - \mathcal{E}_m(A) \\ &= \mathcal{E}_c(B) + \mathcal{E}_{pp}(B) - (\mathcal{E}_c(A) + \mathcal{E}_{pp}(A)) \\ &= \Delta \mathcal{E}_c + \Delta \mathcal{E}_{pp} \end{aligned}$$

$$\text{avec } \Delta \mathcal{E}_c = 0 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Si on choisit le point B d'altitude $z_B = 0$ comme référence de l'énergie potentielle de pesanteur :

$$\mathcal{E}_{pp}(B) = 0 \text{ J et } \mathcal{E}_{pp}(A) = m \cdot g \cdot h$$

$$\text{alors : } \Delta \mathcal{E}_{pp} = -m \cdot g \cdot h, \quad \text{avec } h = AB \cdot \sin \alpha$$

$$\text{et : } \Delta \mathcal{E}_m = -\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 - m \cdot g \cdot AB \cdot \sin \alpha$$

3. La force de freinage étant une force non conservative, $\Delta \mathcal{E}_m = W_{AB}(\vec{f})$

$$\text{avec } W_{AB}(\vec{f}) = \vec{f} \cdot \vec{AB} = -f \cdot AB$$

$$\text{d'où } -f \cdot AB = -\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 - m \cdot g \cdot AB \cdot \sin \alpha$$

$$f = \frac{m \cdot v^2}{2AB} + m \cdot g \cdot \sin \alpha$$

AN :

$$f = \frac{1000 \times \left(\frac{83,5}{3,6}\right)^2}{2 \times 50,0} + 1000 \times 9,81 \times \sin 4,0$$

$$f = 6,1 \times 10^3 \text{ N}$$

20 Un pendule battant la seconde

1. La masse de l'horloge permet de faire tourner les aiguilles et d'entretenir le balancement du pendule. L'échappement à ancre est un mécanisme régulateur qui consiste à bloquer la chute de la masse à intervalles réguliers, à chaque battement du pendule. Il laisse passer une à une les dents de la roue dentée.

$$2. [\ell] = \text{m et } [g] = \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\frac{[\ell]}{[g]} = m \cdot \frac{\text{s}^2}{\text{m}} = \text{s}^2$$

La racine carré du rapport $\frac{\ell}{g}$ est bien homogène à un temps.

3. La période des oscillations d'un pendule battant la seconde est $T = 2,00 \text{ s}$.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}, \quad \text{soit } \ell = g \cdot \frac{T^2}{4\pi^2}$$

$$\ell = 9,812 \times \frac{4,00}{4\pi^2} = 0,994 \text{ m.}$$

La longueur du pendule de Huygens battant la seconde à Paris est de 0,994 m.

4. Au cours des oscillations d'un pendule, il y a transfert d'énergie potentielle de pesanteur en énergie cinétique et inversement.

5. Avec les frottements de l'air, l'amplitude des oscillations diminue au cours du temps; c'est pour cela qu'il faut les entretenir.

6. Un étalon de temps est un dispositif définissant une grandeur de référence qui doit être précise, reproductible, donc immuable. Il sert à définir l'unité du temps. Un pendule pourrait servir d'étalon de temps à condition d'entretenir ses oscillations. Cependant, la période des oscillations d'un pendule dépend de la valeur du champ de pesanteur. Or, cette valeur change avec le lieu : la longueur du pendule qui bat la seconde diffère donc selon le lieu. Par cet aspect, un pendule n'est pas un étalon de temps universel.

21 Le toboggan aquatique

1. L'expression de l'énergie potentielle de pesanteur est $\mathcal{E}_{pp}(D) = m \cdot g \cdot h$.

2. L'expression de l'énergie mécanique est :

$$\mathcal{E}_m(D) = \mathcal{E}_c(D) + \mathcal{E}_{pp}(D), \quad \text{avec } \mathcal{E}_c(D) = 0 \text{ J,}$$

puisque l'enfant part de D sans vitesse initiale.

$$\text{On a donc } \mathcal{E}_m(D) = m \cdot g \cdot h.$$

3. $\mathcal{E}_m(O) = \mathcal{E}_c(O) + \mathcal{E}_{pp}(O)$, avec $\mathcal{E}_p(O) = 0 \text{ J}$, car le point O est choisi comme référence de l'énergie potentielle de pesanteur.

$$\mathcal{E}_m(O) = \mathcal{E}_c(O) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2$$

4. a. L'enfant est soumis à son poids et à la réaction normale du support (les frottements sont négligés).

Parmi ces deux forces, seul le poids qui est une force conservative travaille, donc l'énergie mécanique se conserve :

$$\mathcal{E}_m(D) = \mathcal{E}_m(O),$$

$$\text{soit : } m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2$$

$$v_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

$$\text{b. } v_0 = \sqrt{2 \times 10 \times 5,0} = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

5. a. La vitesse est plus faible que celle trouvée; cela signifie que les frottements ne sont pas négligeables. La force de frottements est une force non conservative qui travaille; l'énergie mécanique ne se conserve donc pas.

$$\text{b. } \mathcal{E}_m(O) - \mathcal{E}_m(D) = W_{DO}(\vec{f})$$

$$W_{DO}(\vec{f}) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0'^2 - m \cdot g \cdot h$$

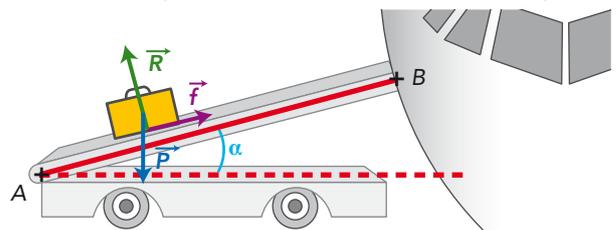
$$W_{DO}(\vec{f}) = \frac{1}{2} \times 35 \times 6,0^2 - 35 \times 10 \times 5,0$$

$$W_{DO}(\vec{f}) = 35 \times \left(\frac{36}{2} - 50\right) = -35 \times 32 = -1,1 \times 10^3 \text{ J}$$

Le signe moins montre que le travail est résistant.

22 Le chargement des bagages

1. La valise est soumise à son poids, \vec{P} , à la réaction normale du tapis, \vec{R} , et à la force motrice du tapis, \vec{f} .



2. La valise est soumise à deux forces qui travaillent : le poids, qui est une force conservative, et la force

matrice \vec{f} , qui est une force non conservative. Son énergie mécanique ne se conserve donc pas au cours du mouvement.

3. L'énergie mécanique ne se conserve pas; sa variation au cours du mouvement de la valise est égale au travail de la force non conservative :

$$\Delta \mathcal{E}_m = W(\vec{f})$$

La force \vec{f} a une direction parallèle au déplacement et de même sens; son travail est donc moteur : la variation d'énergie mécanique est positive.

4. a. Au cours du déplacement \vec{AB} :

$$\Delta \mathcal{E}_m = \mathcal{E}_m(B) - \mathcal{E}_m(A) = \Delta \mathcal{E}_c - \Delta \mathcal{E}_{pp}$$

Puisque la valise se déplace à vitesse constante, $\Delta \mathcal{E}_c = 0$ J.

Si on choisit le point A d'altitude z_A comme référence de l'énergie potentielle de pesanteur :

$$\mathcal{E}_{pp}(A) = 0 \text{ J} \quad \text{et} \quad \mathcal{E}_{pp}(B) = m \cdot g \cdot z_B = m \cdot g \cdot \ell \cdot \sin \alpha.$$

On a donc $\Delta \mathcal{E}_m = m \cdot g \cdot \ell \cdot \sin \alpha$.

On en déduit que $W_{AB}(\vec{f}) = m \cdot g \cdot \ell \cdot \sin \alpha$.

b. $W_{AB}(\vec{f}) = \vec{f} \cdot \vec{AB} = f \cdot \ell = m \cdot g \cdot \ell \cdot \sin \alpha$,

$$\begin{aligned} \text{soit :} \quad f &= m \cdot g \cdot \sin \alpha \\ f &= 20 \times 10 \times \sin 15 = 2,0 \times 10^2 \times 0,26 \\ f &= 5,2 \times 10^1 \text{ N.} \end{aligned}$$

23 Accélération d'une particule α

1. Le noyau d'hélium porte deux charges positives, soit :

$$q_\alpha = 2e$$

2. Le travail de la force électrostatique est donnée par : $W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \vec{AB}$, avec $\vec{F} = q_\alpha \cdot \vec{E}$,

donc : $W_{AB}(\vec{F}) = q_\alpha \cdot \vec{E} \cdot \vec{AB}$.

Comme $\vec{E} \cdot \vec{AB} = E \cdot AB \cdot \cos \alpha = E \cdot AB$ et $E = \frac{U_{AB}}{AB}$:

$$\vec{E} \cdot \vec{AB} = \frac{U_{AB}}{AB} \cdot AB = U_{AB} = V_A - V_B$$

donc $W_{AB}(\vec{F}) = q_\alpha \cdot (V_A - V_B)$.

3. La force électrostatique est une force conservative $\Delta \mathcal{E}_{pé} = \mathcal{E}_{pé}(B) - \mathcal{E}_{pé}(A) = -W_{AB}(\vec{F})$,

d'où : $\Delta \mathcal{E}_{pé} = q_\alpha \cdot (V_B - V_A)$

4. On étudie le système {particule} dans le référentiel terrestre.

La seule force qui s'applique au système est la force électrostatique \vec{F} .

Cette force est conservative, donc l'énergie mécanique se conserve entre A et B.

5. a. $\Delta \mathcal{E}_m = \mathcal{E}_m(B) - \mathcal{E}_m(A) = 0$

$$\Delta \mathcal{E}_m = \mathcal{E}_c(B) + \mathcal{E}_{pé}(B) - \mathcal{E}_c(A) - \mathcal{E}_{pé}(A) = \Delta \mathcal{E}_c + \Delta \mathcal{E}_{pé}$$

$$\Delta \mathcal{E}_m = 0, \quad \text{donc} \quad \Delta \mathcal{E}_{pé} = -\Delta \mathcal{E}_c$$

En A, la vitesse est négligeable devant celle en B :

$$\Delta \mathcal{E}_c = \frac{1}{2} \cdot m_\alpha \cdot v_B^2$$

$$\text{Par suite :} \quad q_\alpha \cdot (V_B - V_A) = -\frac{1}{2} \cdot m_\alpha \cdot v_B^2$$

$$V_A - V_B = \frac{m_\alpha \cdot v_B^2}{2 \cdot q_\alpha}$$

$$\text{b. } V_A - V_B = \frac{6,70 \times 10^{-27} \times (1,00 \times 10^6)^2}{2 \times 2 \times 1,60 \times 10^{-19}}$$

$$V_A - V_B = 1,05 \times 10^4 \text{ V}$$

24 Service au tennis

1. a. La balle est soumise uniquement à son poids.

b. Le poids est une force conservative.

2. $\mathcal{E}_m(A) = \mathcal{E}_c(A) + \mathcal{E}_{pp}(A)$

On choisit le point O comme référence pour l'énergie potentielle de pesanteur :

$$\mathcal{E}_{pp}(A) = m \cdot g \cdot y_A = m \cdot g \cdot H$$

$$\text{et :} \quad \mathcal{E}_c(A) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2$$

$$\text{donc :} \quad \mathcal{E}_m(A) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2 + m \cdot g \cdot H.$$

Au point B, $y_B = 0$:

$$\mathcal{E}_m(B) = \mathcal{E}_c(B) + \mathcal{E}_{pp}(B) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2$$

3. La balle est soumise à son poids qui est une force conservative; son énergie mécanique se conserve :

$$\mathcal{E}_m(A) = \mathcal{E}_m(B)$$

$$\text{4. a. } \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2 + m \cdot g \cdot H = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2$$

Il vient $v_B = \sqrt{v_0^2 + 2 \cdot g \cdot h}$

$$\text{b. } v_B = \sqrt{\left(\frac{126 \times 10^3}{3600}\right)^2 + 2 \times 9,81 \times 2,20}$$

$$v_B = 35,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 128 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

c. La vitesse est beaucoup plus faible, les frottements ne sont donc pas négligés.

25 Hydroelectric dam

Traduction du texte et des questions :

« Dans un barrage hydroélectrique, l'énergie potentielle de pesanteur est convertie lorsque l'eau tombe. On considère la chute de mille mètres cubes d'eau sur 500 pieds.

1. En quelles énergies est convertie l'énergie potentielle de pesanteur ? Quel est l'intérêt de ces conversions ?

2. On considère que 90 % de l'énergie est convertie. Quelle énergie récupère-t-on lors de cette chute ?

3. Pourquoi le rendement n'est-il pas de 100 % ? En quelle énergie est convertie l'énergie perdue ? »

1. L'énergie potentielle de pesanteur est convertie en énergie cinétique, puis en énergie électrique.

Cela permet de produire de l'énergie électrique en fonction de la demande.

2. $\Delta \mathcal{E}_{pp} = m \cdot g \cdot h$

$$\Delta \mathcal{E}_{pp} = 1000 \times 1000 \times 9,81 \times 500 \times 0,3048$$

$$\Delta \mathcal{E}_{pp} = 1,49 \times 10^9 \text{ J}$$

Énergie électrique produite :

$$\mathcal{E}_{el} = 0,9 \times \Delta \mathcal{E}_p = 0,9 \times 1,49 \times 10^9$$

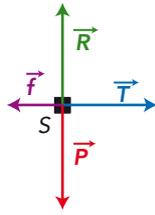
$$\mathcal{E}_{el} = 1,34 \times 10^9 \text{ J}$$

3. Une partie de l'énergie potentielle de pesanteur est dissipée à cause des forces de frottements. L'énergie perdue est dissipée sous forme de chaleur.

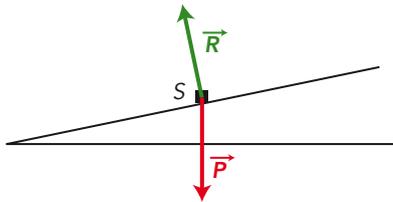
Pour aller plus loin

26 Épreuve du saut nautique

1. Au cours du trajet AB, la skieuse S est soumise à son poids, \vec{P} , à la réaction normale de la surface de l'eau, \vec{R} , à la force de traction, \vec{T} , et la force de frottements, \vec{f} .



Au cours du trajet BC, la skieuse S est soumise à son poids et à la réaction du tremplin dont la direction est perpendiculaire au déplacement.



2. Au cours du trajet AB, le poids et la réaction sont des forces dont la direction est perpendiculaire au déplacement; elles ne travaillent pas.

$$W_{AB}(\vec{f}) = \vec{f} \cdot \vec{AB} = -f \cdot AB$$

$$W_{AB}(\vec{T}) = \vec{T} \cdot \vec{AB} = T \cdot AB$$

Au cours du trajet BC, seul le poids travaille :

$$W_{BC}(\vec{P}) = \vec{P} \cdot \vec{BC} = m \cdot g \cdot (z_B - z_C)$$

$W_{BC}(\vec{P}) = -m \cdot g \cdot BC \cdot \sin \alpha$ (l'axe (Oz) est vertical ascendant et le point d'altitude $z = 0$ est situé au niveau de la surface de l'eau).

3. La force de traction est non conservative; cela signifie que le travail de cette force dépend du chemin suivi.

4. a. La skieuse étant soumis à des forces non conservatives, entre A et B, l'énergie mécanique ne se conserve pas :

$$\mathcal{E}_m(B) - \mathcal{E}_m(A) = W_{AB}(\vec{f}) + W_{AB}(\vec{T})$$

b. En choisissant, la surface de l'eau comme référence pour l'énergie potentielle de pesanteur :

$$\mathcal{E}_{pp}(A) = \mathcal{E}_{pp}(B) = 0 \text{ J}$$

La relation de la question 4a permet d'écrire :

$$\mathcal{E}_c(B) - \mathcal{E}_c(A) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2 = -f \cdot AB + T \cdot AB \text{ (en A, la vitesse est nulle)}$$

$$T = \left(\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2 + f \cdot AB \right) \cdot \frac{1}{AB}$$

$$T = \left(\frac{1}{2} \times 60,0 \times \left(\frac{57,0 \times 10^3}{3600} \right)^2 + 150 \times 200 \right) \times \frac{1}{200}$$

$$T = 188 \text{ N}$$

5. a. Le long du trajet BC, la skieuse est soumise uniquement à une force conservative, son poids; son énergie mécanique se conserve.

b. $\mathcal{E}_m(B) = \mathcal{E}_m(C)$

$$\text{soit : } \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_C^2 + m \cdot g \cdot z_C$$

avec $z_C = BC \cdot \sin \alpha$.

$$\text{Donc : } \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_C^2 + m \cdot g \cdot BC \cdot \sin \alpha$$

$$v_C = \sqrt{v_B^2 - 2 \cdot g \cdot BC \cdot \sin \alpha}$$

$$v_C = \sqrt{\left(\frac{57,0 \times 10^3}{3600} \right)^2 - 2 \times 9,81 \times 6,40 \times \sin(14,0)}$$

$$v_C = 14,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 53,4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

6. Entre B et D : $\mathcal{E}_m(B) = \mathcal{E}_m(D)$

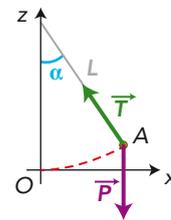
$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_D^2 + m \cdot g \cdot z_D$$

$$z_D = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{v_B^2 - v_D^2}{g} \right)$$

$$z_D = \frac{1}{2} \times \left(\frac{\left(\frac{57,0 \times 10^3}{3600} \right)^2 - \left(\frac{51,0 \times 10^3}{3600} \right)^2}{9,81} \right) = 2,55 \text{ m}$$

27 Le pendule de Foucault

1. La sphère est soumise à son poids, \vec{P} , et à la tension du fil, \vec{T} .



2. a. Son énergie mécanique reste constante au cours du temps.

b. Il y a transfert complet de l'énergie potentielle de pesanteur en énergie cinétique, puis inversement.

3. a. $\mathcal{E}_m(A) = \mathcal{E}_c(A) + \mathcal{E}_{pp}(A) = \mathcal{E}_{pp}(A)$

$$\mathcal{E}_{pp}(A) = m \cdot g \cdot L \cdot (1 - \cos \alpha)$$

b. $\mathcal{E}_m(O) = \mathcal{E}_c(O) + \mathcal{E}_{pp}(O) = \mathcal{E}_c(O) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2$

$$4. m \cdot g \cdot L \cdot (1 - \cos \alpha) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2,$$

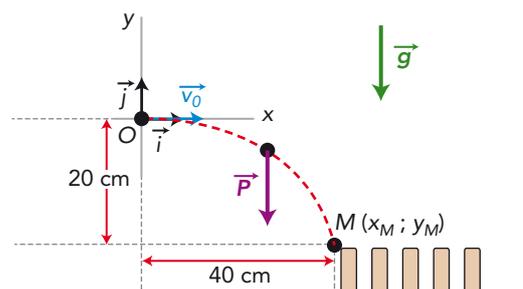
$$\text{soit : } \cos \alpha = 1 - \frac{v_0^2}{2g \cdot L} = 9,99 \times 10^{-1},$$

$$\text{donc : } \alpha = 2,56^\circ.$$

5. Avec son pendule, FOUCAULT a mis évidence la rotation de la Terre sur elle-même.

28 Les dominos

1. a. La bille est soumise uniquement à son poids, \vec{P} , entre les points O et M exclus.



b. Le système {bille} est étudié dans le référentiel terrestre supposé galiléen. La deuxième loi de Newton s'écrit :

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a},$$

d'où : $\vec{P} = m \cdot \vec{a} \Leftrightarrow m \cdot \vec{g} = m \cdot \vec{a}$.

Finalement : $\vec{a} = \vec{g}$.

c. En prenant une primitive, on obtient :

$$\vec{v} \begin{pmatrix} v_x = v_0 \\ v_y = -g \cdot t \end{pmatrix}$$

puisque à $t = 0$ $\vec{v}_0 \begin{pmatrix} v_{0x} = v_0 \\ v_{0y} = 0 \end{pmatrix}$

d. On a
$$\begin{cases} v_x = v_0 = \frac{dx}{dt} \\ v_y = -g \cdot t = \frac{dy}{dt} \end{cases}$$

donc
$$\begin{cases} x(t) = v_0 \cdot t + C_1 \\ y(t) = -\frac{1}{2}g \cdot t^2 + C_2 \end{cases}$$

D'après les conditions initiales :

$$\begin{cases} x(0) = 0 = C_1 \\ y(0) = 0 = C_2 \end{cases}$$

Finalement :
$$\begin{cases} x(t) = v_0 \cdot t \\ y(t) = -\frac{1}{2}g \cdot t^2 \end{cases}$$

Pour obtenir l'équation de la trajectoire, on isole le temps « t » de la première équation que l'on reporte dans la seconde :

$$t = \frac{x}{v_0} \rightarrow y(x) = -\frac{1}{2}g \cdot \left(\frac{x}{v_0}\right)^2$$

e. Au point M : $y_M = -\frac{g \cdot x_M^2}{2 \cdot v_0^2}$

soit : $v_0^2 = -\frac{g \cdot x_M^2}{2 \cdot y_M}$

En remarquant que $y_M < 0$ et en ne conservant que la valeur positive de v_0 , il vient :

$$v_0 = \sqrt{-\frac{g \cdot x_M^2}{2 \cdot y_M}}$$

$$v_0 = \sqrt{-\frac{10 \times 0,40^2}{2 \times (-0,20)}} = \sqrt{\frac{10 \times 0,40^2}{0,40}} = \sqrt{4,0} = 2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

2. a. Seul le poids travaille, car il n'est pas perpendiculaire au déplacement.

b. L'énergie mécanique de la bille se conserve entre A et B.

c. $\mathcal{E}_m(A) = \mathcal{E}_c(A) + \mathcal{E}_{pp}(A)$

En tenant compte du choix de l'origine de l'énergie potentielle de pesanteur au point O et sachant que $v_A = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, on a :

$$\mathcal{E}_m(A) = m \cdot g \cdot y_A$$

d. $\mathcal{E}_m(B) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2 + m \cdot g \cdot y_B$

Or, $y_B = 0 \text{ m}$, donc $\mathcal{E}_m(B) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2$

e. $\mathcal{E}_m(A) = \mathcal{E}_m(B)$

soit : $m \cdot g \cdot y_A = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2$

$$\text{Or, } v_0 = v_B. \text{ Donc } y_A = \frac{v_0^2}{2 \cdot g}$$

$$f. y_A = \frac{2,0^2}{2 \times 10} = 0,20 \text{ m}$$

29 Le grand huit

1. L'altitude du wagon est $z = R \cdot (1 - \cos \theta)$.

2. Le wagon n'est soumis qu'à son poids, force conservative, donc l'énergie mécanique se conserve au cours du mouvement :

$$\mathcal{E}_m(\text{initiale}) = \mathcal{E}_m(M)$$

Le wagon part sans vitesse initiale, son énergie cinétique au départ est donc nulle.

L'origine de l'énergie potentielle de pesanteur est choisie en $z = 0$:

$$\mathcal{E}_{pp}(\text{initiale}) = m \cdot g \cdot H,$$

soit : $\mathcal{E}_m(\text{initiale}) = m \cdot g \cdot H.$

En M :

$$\mathcal{E}_m(M) = \mathcal{E}_c(M) + \mathcal{E}_{pp}(M) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_M^2 + m \cdot g \cdot z_M$$

Donc : $\mathcal{E}_m(M) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_M^2 + m \cdot g \cdot R \cdot (1 - \cos \theta)$

La conservation de l'énergie mécanique permet d'écrire :

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_M^2 + m \cdot g \cdot R \cdot (1 - \cos \theta) = m \cdot g \cdot H$$

On en déduit :

$$v_M = \sqrt{2g \cdot (H - R \cdot (1 - \cos \theta))}$$

3. Au sommet S de la boucle :

$$\theta = \pi, \text{ donc } v_S = \sqrt{2g \cdot (H - 2R)}$$

4. À partir de la relation trouvée à la question 3, on déduit que :

$$H = \frac{v_S^2}{2g} + 2R$$

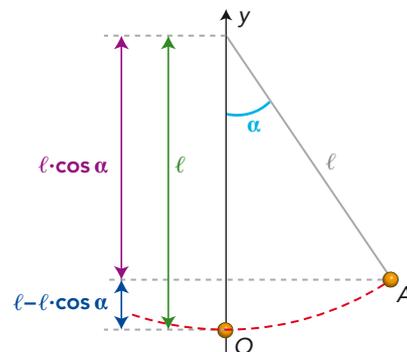
$$H = \frac{13,8^2}{2 \times 9,81} + 2 \times 19 = 48 \text{ m}.$$

30 Le pendule électrostatique

1. a. $W_{OA}(\vec{P}) = \vec{P} \cdot \vec{OA} = P \cdot OA \cdot \cos \alpha$

où $\cos \alpha = \frac{(y_O - y_A)}{OA}$

Donc $W_{OA}(\vec{P}) = P \cdot (y_O - y_A) = m \cdot g \cdot (y_O - y_A)$



$$y_O - y_A = -l \cdot (1 - \cos \alpha),$$

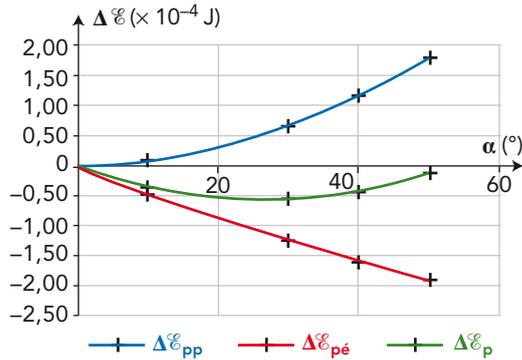
soit $W_{OA}(\vec{P}) = -m \cdot g \cdot l \cdot (1 - \cos \alpha).$

b. $W_{OA}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \vec{OA} = q \cdot \vec{E} \cdot \vec{OA} = q \cdot E \cdot l \cdot \sin \alpha$

2. $\Delta \mathcal{E}_{pp} = -W_{OA}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot l \cdot (1 - \cos \alpha)$

$\Delta \mathcal{E}_{pé} = -W_{OA}(\vec{F}) = -q \cdot E \cdot l \cdot \sin \alpha$

3. Variation des énergies potentielles pour différentes valeurs de α :

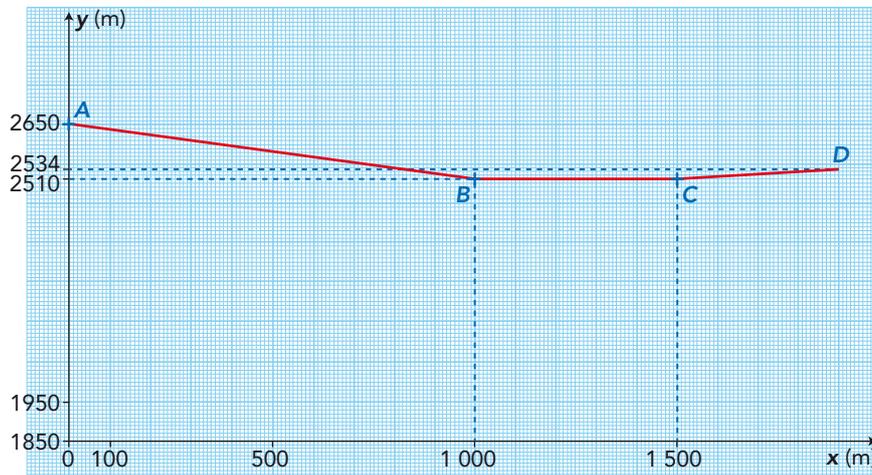


4. Pour $\alpha = 26^\circ$, la variation d'énergie potentielle passe par un extremum. Le pendule est dans une position d'équilibre.

Retour sur l'ouverture du chapitre

31 Amateur de sensations fortes

1. Trajectoire de S :



2. a. Le système possède de l'énergie potentielle de pesanteur et de l'énergie cinétique.

b. Entre A et B, \mathcal{E}_c augmente et \mathcal{E}_{pp} diminue.
Entre B et C, \mathcal{E}_c diminue et \mathcal{E}_{pp} reste constante.
Entre C et D, \mathcal{E}_c diminue et \mathcal{E}_{pp} augmente.

3. a. $\mathcal{E}_m(A) = \mathcal{E}_c(A) + \mathcal{E}_{pp}(A)$

$$\mathcal{E}_{pp}(A) = m \cdot g \cdot (y_A - y_O),$$

y_O étant l'altitude à Orcières.

b. $\mathcal{E}_m(A) = 6,8 \times 10^5 \text{ J}$

4. a. La valeur de la vitesse de S est maximale en B.

b. $\mathcal{E}_m(B) - \mathcal{E}_m(A) = W_{AB}(\vec{f}) = -f \cdot AB$

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{\max}^2 + m \cdot g \cdot (y_B - y_O) - m \cdot g \cdot (y_A - y_O) = -f \cdot AB$$

$$v_{\max} = \sqrt{2g \cdot (y_A - y_B) - \frac{2 \cdot f \cdot AB}{m}} = 37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1},$$

soit $130 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

c. La valeur annoncée par l'énoncé est de $140 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Cet écart peut être dû à une force de frottements non constante sur toute la trajectoire ou de valeur un peu plus faible que celle de l'énoncé.

5. a. $\mathcal{E}_m(C) - \mathcal{E}_m(B) = \mathcal{E}_c(C) - \mathcal{E}_c(B)$

$$\mathcal{E}_c(C) - \mathcal{E}_c(B) = W_{BC}(\vec{f}) = -f \cdot BC$$

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_C^2 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{\max}^2 = -f \cdot BC$$

$$v_C = \sqrt{v_{\max}^2 - 2 \frac{f \cdot BC}{m}}$$

b. $v_C = 26,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

6. a. $\mathcal{E}_m(D) - \mathcal{E}_m(C) = \mathcal{E}_{pp}(D) - \mathcal{E}_{pp}(C) - \mathcal{E}_c(C)$

$$\mathcal{E}_m(D) - \mathcal{E}_m(C) = W_{CD}(\vec{f}) = -f \cdot CD$$

$$m \cdot g \cdot (y_D - y_C) - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_C^2 = -f \cdot CD$$

Or, $y_D - y_C = 0,06 \times CD$, car S est alors sur un trajet de pente de 6 %.

Il vient :

$$CD \cdot (0,06 m \cdot g + f) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_C^2$$

$$CD = \frac{m \cdot v_C^2}{2(0,06 m \cdot g + f)}$$

$$CD = 2,7 \times 10^2 \text{ m}$$

b. Damien parcourt 270 m avant de s'arrêter. Le câble faisant 400 m, le résultat est cohérent.

Comprendre un énoncé

32 À la fête foraine

1. a. $W_{OC}(\vec{f}) = \vec{f} \cdot \vec{OC} = -f \cdot OC$

b. $W_{OC}(\vec{f}) = W_{OB}(\vec{f}) + W_{BC}(\vec{f})$

$$W_{OC}(\vec{f}) = \vec{f} \cdot \vec{OB} + \vec{f} \cdot \vec{BC}$$

$$W_{OC}(\vec{f}) = -f \cdot OB - f \cdot BC$$

$$W_{OC}(\vec{f}) = -f \cdot (OC + 2 BC)$$

c. On constate que les deux expressions précédentes sont différentes. Entre les points O et C, le travail dépend du chemin suivi. Les frottements sont donc des forces non conservatives.

2. a. En B, le palet possède de l'énergie potentielle de pesanteur.

En C, le palet possède également de l'énergie potentielle de pesanteur.

b. Au cours du mouvement entre B et C, l'énergie potentielle de pesanteur est partiellement convertie en énergie cinétique. L'autre partie est dissipée sous forme de chaleur.

3. $\Delta \mathcal{E}_m = \mathcal{E}_m(C) - \mathcal{E}_m(B) = W_{BC}(\vec{f}) = -f \cdot BC$

On choisit le rail horizontal comme référence pour l'énergie potentielle de pesanteur :

$$\mathcal{E}_m(C) = \mathcal{E}_c(C) + \mathcal{E}_{pp}(C) = 0 \text{ J}$$

$$\mathcal{E}_m(B) = \mathcal{E}_c(B) + \mathcal{E}_{pp}(B) = m \cdot g \cdot AB \cdot \sin \alpha$$

$$0 - m \cdot g \cdot AB \cdot \sin \alpha = -f \cdot BC$$

$$BC = \frac{m \cdot g \cdot AB \cdot \sin \alpha}{f}$$

$$BC = \frac{5,0 \times 9,81 \times 4,0 \times \sin 30}{10} = 9,8 \text{ m}$$

Activités

1 Et « l'éther » s'évapore... (p. 210)

1 Le texte illustre une démarche scientifique car le scientifique :

- émet une hypothèse (l'existence de l'éther) ;
- applique des lois qui justifient cette hypothèse (lois de la mécanique galiléenne appliquées à la lumière dans le cas de l'existence de l'éther) ;
- met en place une ou plusieurs expériences pour vérifier son hypothèse (utilisation du phénomène d'interférences pour détecter un écart de durée) ;
- interprète les résultats obtenus (l'observation est non conforme aux prévisions. La figure d'interférences reste la même quelle que soit l'orientation de l'interféromètre) ;
- réitère plusieurs fois l'expérience (elle donne toujours les mêmes résultats).

L'échec de l'expérience, selon les prévisions de A. MICHELSON et E. MORLEY, a permis de remettre en cause les hypothèses de travail et a donc permis l'émergence d'une nouvelle théorie.

2 La théorie de la relativité restreinte est en contradiction avec les conceptions de la mécanique galiléenne, car elle considère que la vitesse de la lumière est invariante, c'est-à-dire que sa valeur ne dépend pas du référentiel d'étude.

Ces deux théories ne sont pas incompatibles, car l'application de la relativité restreinte à des systèmes à faible vitesse permet de retrouver les conclusions de la mécanique galiléenne.

3 La vitesse de la lumière dans le vide a la même valeur dans tous les référentiels.

Remarque 1 : l'invariance de la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide s'applique dans tous les référentiels galiléens.

Remarque 2 : l'expérience de A. MICHELSON et E. MORLEY confirme l'invariance de la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide dans tous les référentiels galiléens, ou du moins ne l'infirme pas.

D'autres expériences confirment ce résultat, comme l'observation d'étoiles doubles (voir exercice 23, p. 224 du manuel).

En 1964, ALVÄGER a apporté une autre preuve en mesurant la valeur de la vitesse des photons émis lors de la désintégration de particules se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière. Il a montré que ces photons se déplacent à la vitesse de la lumière ; la composition des vitesses ne s'applique pas pour la lumière (voir exercice 24, p. 225 du manuel).

2 ... lorsque la relativité arriva (p. 211)

1 $\Delta t = \frac{d}{v} = \frac{10 \times 10^3}{0,998 \times 3,00 \times 10^8} = 3,3 \times 10^{-5} \text{ s} = 33 \mu\text{s}$

Pour parcourir 10 km, les muons mettent 33 μs ; on retrouve bien le résultat annoncé dans le texte.

2 La distance parcourue par le muon en 2,2 μs est :

$$d = v \cdot \Delta T_0 = 0,998 \times 3,00 \times 10^8 \times 2,2 \times 10^{-6}$$
$$d = 6,6 \times 10^2 \text{ m.}$$

Cette distance est très faible devant l'épaisseur de 10 km d'atmosphère à traverser par les muons pour atteindre le sol. D'après la mécanique classique, les muons n'ont pas le temps d'atteindre la Terre.

3 a. Pour ces muons :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - 0,998^2}} = 15,8.$$

b. $\Delta T' = \gamma \cdot \Delta T_0 = 15,8 \times 2,2 \times 10^{-6}$

$$\Delta T' = 35 \times 10^{-6} \text{ s} = 35 \mu\text{s}$$

La durée de vie moyenne d'un muon mesurée sur Terre est de 35 μs .

c. La durée de vie du muon, pour un observateur terrestre, devient 15,8 fois plus grande que dans le référentiel lié au muon, d'où l'expression « dilatation des durées ».

d. $\Delta T' > 33 \mu\text{s}$, donc les muons formés dans la haute atmosphère peuvent atteindre le sol.

4 La mécanique galiléenne ne peut pas expliquer l'observation de muons sur Terre. Le modèle de relativité restreinte a permis, par la dilatation des durées, d'expliquer cette observation.

3 « Être à l'heure pour se situer » (p. 212-213)

1 La localisation par GPS est basée sur la triangulation. Les satellites GPS envoient des bips avec l'heure de départ du bip et la position du satellite. Le récepteur GPS calcule la distance qui le sépare de chaque satellite. Il en déduit sa position par l'intersection d'au moins quatre sphères (chaque sphère a pour rayon la distance entre le satellite concerné et le récepteur GPS, elle est centrée sur le satellite). Les horloges des satellites et du récepteur GPS doivent être synchronisées.

2 Si les horloges des satellites et du récepteur GPS ne sont pas synchronisées, les mesures de distances seront fausses.

3 Si les horloges sont synchronisées, la durée de l'aller est égale à la durée du retour :

$$t_2 - t_1 = t'_1 - t_2 \quad \text{d'où} \quad t_2 = \frac{t_1 + t'_1}{2}$$

4 a. Les deux horloges des balises B_1 et B_2 sont synchronisées et le promeneur P reçoit les signaux simultanément avec leur date d'émission.

P sait que la balise B_2 a émis un signal 1 ms avant la balise B_1 . P en déduit qu'il est plus près de B_1 que de B_2 .

L'écart de distance $PB_2 - PB_1$ est égal à $1 \text{ ms} \times v$, avec v la valeur de la vitesse de propagation des signaux.

b. $PB_2 - PB_1 = 1,00 \times 10^{-3} \times 3,00 \times 10^8$ (1)
 $= 3,00 \times 10^5 \text{ m},$

$PB_2 + PB_1 = 900 \text{ km} = 9,00 \times 10^5 \text{ m}.$ (2)

(1) + (2) donne $2PB_2 = 12,00 \times 10^5 \text{ m},$

d'où : $PB_2 = 6,00 \times 10^5 \text{ m}.$

De l'équation (1), par exemple, on déduit que :

$PB_1 = 3,00 \times 10^5 \text{ m}.$

c. Le promeneur connaît la distance qui le sépare de la balise B_2 .

Dans le signal provenant de cette dernière, il y a la date t de son émission.

P le reçoit à la date T' indiquée par sa montre.

Si $T' = t + \frac{PB_2}{v}$, alors sa montre est synchronisée avec l'horloge de la balise B_2 .

Si $T' > t + \frac{PB_2}{v}$, alors la montre avance par rapport à l'horloge et elle retarde si $T' < t + \frac{PB_2}{v}$.

5 a. $\Delta T' = \gamma \cdot \Delta T_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ avec ΔT_0 la durée propre

entre l'émission de deux signaux consécutifs mesurée par l'horloge embarquée dans un satellite située à proximité de l'émetteur et $\Delta T'$ la durée entre l'émission des deux signaux consécutifs mesurée par l'horloge terrestre.

b. $\Delta T' > \Delta T_0$ (car $\gamma > 1$), donc l'horloge embarquée dans le satellite indique une date antérieure à celle affichée par l'horloge terrestre. Le retard a pour expression :

$$\Delta T' - \Delta T_0 = (\gamma - 1) \cdot \Delta T_0$$

c. Au bout de 24 heures le retard est de :

$$(\Delta T' - \Delta T_0) \times 24 \times 3600 = \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(3,9 \times 10^3)^2}{(3,00 \times 10^8)^2}}} - 1 \right] \times 24 \times 3600 = 7,3 \times 10^{-6} \text{ s}.$$

d. Le résultat confirme les 7 μs de retard annoncées dans le texte.

6 a. Le bilan des phénomènes de relativités restreinte et générale conduit à une avance de $45 - 7 = 38 \mu\text{s}$ par cycle de 24 heures.

b. En multipliant cette avance par la valeur de la vitesse de la lumière, on obtient une erreur au bout de 24 heures de :

$$38 \times 10^{-6} \times 3,00 \times 10^8 = 11 \times 10^3 \text{ m} = 11 \text{ km}.$$

Si on ne corrige pas cet effet, il s'ensuit une erreur de positionnement de 11 km au bout de 24 h.

Exercices (p. 217-227)

QCM

- 1** 1. A ; 2. C ; **2** 1. B ; 2. C ; 3. C ; 4. A ; 5. B ;
3 1. A et C ; 2. B.

Application immédiate

4 Définir la notion de durée propre et exploiter la relation entre durée propre et durée mesurée

$$\Delta T' = \gamma \cdot \Delta T_0 = \frac{\Delta T_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2,51 \times 10^{-6}}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,95c}{c}\right)^2}} = 8,0 \times 10^{-6} \text{ s} = 8,0 \mu\text{s}$$

La durée de vie mesurée de cette particule dans le référentiel (R) est de 8,0 μs .

Pour commencer

5 Connaître l'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide

- On postule que la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide est la même dans tout référentiel galiléen.
- Le premier physicien à l'avoir énoncé est A. EINSTEIN.

6 Connaître la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide

- La valeur de la vitesse de la lumière dans le vide, avec trois chiffres significatifs, est égale à $3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

2. La valeur de la vitesse de la lumière dans le vide est aujourd'hui connue de façon exacte. Elle est fixée à $2,997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

7 Attribuer les principes

a. En mécanique classique, le temps est *absolu* et la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide est *relative*. C'est la mécanique d'*Isaac NEWTON*.

b. En relativité restreinte, le temps est *relatif* et la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide est *absolue*. C'est la mécanique d'*Albert EINSTEIN*.

8 Comprendre la relation entre durée propre et durée mesurée

1. La durée propre ΔT_0 est mesurée par une horloge fixe dans un référentiel galiléen (R) et telle que les événements se déroulent au même endroit et à proximité de cette horloge.

La durée mesurée $\Delta T'$ est mesurée par des horloges fixes et synchronisées dans un référentiel galiléen (R'). Les deux référentiels et, par conséquent, les horloges sont en mouvement relatif l'un par rapport à l'autre. Dans (R'), les deux événements ne se produisent pas au même endroit.

2. Puisque v et c sont positifs et que $v < c$, le rapport $\frac{v}{c}$ et son carré sont compris entre 0 et 1.

$1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2$ est donc compris entre 0 et 1 ainsi que sa racine carrée. Enfin, l'inverse d'un nombre compris entre 0 et 1 est supérieur à 1.

γ est donc supérieur à 1.

3. L'observateur en mouvement par rapport aux événements mesure une durée $\Delta T'$ supérieure à la durée propre ΔT_0 puisque $\gamma > 1$. On parle ainsi de durée dilatée mesurée par cet observateur.

9 Étudier un électron dans le tube cathodique d'un téléviseur

1. De la formule de γ , on peut tirer v :

$$\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} = \frac{1}{\gamma} \Leftrightarrow 1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2 = \frac{1}{\gamma^2}$$

$$\Leftrightarrow \left(\frac{v}{c}\right)^2 = 1 - \frac{1}{\gamma^2} \Leftrightarrow v = c \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}}$$

2. $v = 2,997\,924\,58 \times 10^8 \times \sqrt{1 - \frac{1}{1,05^2}}$

$$v = 9,14 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

La valeur de la vitesse de déplacement de l'électron dans un référentiel terrestre est de $9,14 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

10 Exploiter le coefficient γ

1. L'astronaute en mouvement par rapport à la Terre ne peut pas être proche des deux événements. La durée séparant les deux événements est donc, pour l'astronaute, une durée mesurée.

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,80 \times c}{c}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - (0,80)^2}} = 1,7$$

La durée mesurée $\Delta T'$ par l'astronaute est égale à 1,7 fois la durée propre ΔT_0 .

2. Lorsque la durée mesurée est doublée par rapport à la durée propre, $\gamma = 2$.

De la formule de γ , on peut tirer v :

$$\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} = \frac{1}{\gamma} \Leftrightarrow 1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2 = \frac{1}{\gamma^2}$$

$$\Leftrightarrow \left(\frac{v}{c}\right)^2 = 1 - \frac{1}{\gamma^2} \Leftrightarrow v = c \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}}$$

$$v = c \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{2^2}} = 0,87 \times c$$

L'astronaute doit se déplacer à une vitesse de valeur $v = 0,87 \times c$ pour que la durée qu'il mesure entre deux événements soit doublée par rapport à la durée propre sur Terre.

11 Exploiter la relation entre durée propre et durée mesurée

1. Vu de la Terre, ce voyage a duré :

$$\Delta T' = \frac{d}{v} = \frac{\text{durée du trajet} \times c}{0,90 \times c} = 4,4 \text{ ans.}$$

2. Pour l'astronaute :

$$\Delta T_0 = \frac{\Delta T'}{\gamma} = \Delta T' \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$\Delta T_0 = \Delta T' \cdot \sqrt{1 - \frac{0,90^2 c^2}{c^2}} = 1,9 \text{ an.}$$

12 Distinguer physique classique ou relativité restreinte

La théorie 1 correspond au postulat B et la théorie 2 au postulat A.

13 Étudier le vol d'un pigeon

Les touristes ne doivent pas utiliser la relativité restreinte pour l'étude du vol d'un pigeon, car ce dernier se déplace avec une vitesse de valeur très faible comparée à celle de la lumière.

Pour s'entraîner

14 La relativité du temps

1. Les deux événements dont on cherche à mesurer la durée qui les sépare sont les passages de l'OVNI au-dessus de Bordeaux et d'Arcachon.

2. Dans le référentiel de la soucoupe, les deux événements sont proches de l'horloge embarquée dans l'OVNI. La durée mesurée par l'extraterrestre est une durée propre.

3. Les horloges synchronisées et fixes dans un référentiel terrestre qu'utilise Nicolas pour mesurer la durée séparant les passages de l'OVNI au-dessus de Bordeaux et d'Arcachon indiquent une durée mesurée. En effet, ces horloges sont en mouvement par rapport à celle qui mesure la durée propre.

$$\Delta T' = \frac{d}{v} = \frac{d}{\frac{2}{3}c} = \frac{3 \times 49 \times 10^3}{2 \times 3,00 \times 10^8} = 2,5 \times 10^{-4} \text{ s}$$

Nicolas mesure une durée de survol égale à $2,5 \times 10^{-4} \text{ s}$.

$$4. \Delta T_0 = \frac{\Delta T'}{\gamma} = \Delta T' \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{d}{v} \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$\Delta T_0 = \frac{3 \times 49 \times 10^3}{2 \times 3,00 \times 10^8} \times \sqrt{1 - \left(\frac{2}{3}\right)^2} = 1,8 \times 10^{-4} \text{ s}$$

La durée propre du survol de l'OVNI mesurée par l'extraterrestre est $\Delta T_0 = 1,8 \times 10^{-4} \text{ s}$.

15 Une période variable

1. Les deux événements à considérer pour étudier la période d'un signal lumineux sont les émissions consécutives de deux signaux lumineux.

2. La période propre de ce signal lumineux est celle mesurée à bord de la fusée :

$$\Delta T_0 = \frac{1}{f} = \frac{1}{5,0} = 0,20 \text{ s.}$$

3. La période mesurée par l'ami resté sur Terre est :

$$\Delta T' = \gamma \cdot \Delta T_0, \quad \text{avec } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\Delta T' = \frac{0,20}{\sqrt{1 - \frac{(250\,000 \times 10^3)^2}{(3,00 \times 10^8)^2}}} = 0,36 \text{ s.}$$

16 À chacun son rythme

1. La durée mesurée par l'horloge correspond à la durée entre le passage de la sonde au niveau du Soleil et son arrivée dans la nébuleuse de la Lyre. Ces deux événements sont proches de l'horloge située à bord de la sonde. La durée ΔT_S est donc une durée propre.

2. La durée ΔT_R est une durée mesurée avec :

$$\Delta T_R = \gamma \cdot \Delta T_S \quad \text{et} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Dans cette formule, v est la valeur de la vitesse relative des horloges, c'est-à-dire la vitesse de la sonde dans le référentiel héliocentrique.

$$3. \Delta T_R = \frac{d_R}{v}$$

$$4. \Delta T_R = \gamma \cdot \Delta T_S = \frac{\Delta T_S}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{et} \quad \Delta T_R = \frac{d_R}{v}$$

$$\text{Il vient } \frac{\Delta T_S}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{d_R}{v}$$

En élevant le tout au carré, on obtient :

$$\frac{\Delta T_S^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{d_R^2}{v^2}$$

$$\text{En isolant la vitesse, il vient : } v = \frac{d_R \cdot c}{\sqrt{\Delta T_S^2 \cdot c^2 + d_R^2}}$$

Avec $d_R = 42 \times 10^3$ années de lumière que l'on convertit en mètre, $\Delta T_S = 20\,000$ ans que l'on convertit en seconde et $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, on trouve :

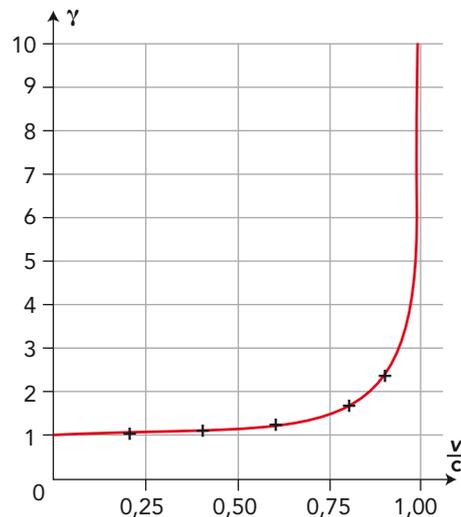
$$v = 2,7 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

17 Relativité es-tu là ?

1.

$\frac{v}{c}$	0	0,200	0,400	0,600	0,800	0,900	0,99
γ	1	1,02	1,09	1,25	1,67	2,29	10,0

2.



3. On convertit v en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. On obtient ainsi le rapport $\frac{v}{c} = 1,14 \times 10^{-6}$.

Le point représentatif est quasiment confondu avec l'ordonnée à l'origine : $\gamma = 1$.

Puisque $\gamma = 1$, il n'y a pas d'effet relativiste et la mécanique classique convient.

4. a. Pour une augmentation de 10 % des durées :

$$\Delta T' = \Delta T_0 + 10\% \cdot \Delta T_0 = 1,10 \Delta T_0; \quad \gamma = 1,1.$$

b. On lit dans le tableau : $\frac{v}{c} = 0,40$ pour $\gamma = 1,1$.

$$\text{Alors } v = 0,40 \times c = 1,2 \times 10^5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}.$$

5. Les effets relativistes sont longtemps passés inaperçus, car ils ne se manifestent de manière sensible que pour des vitesses de valeurs très élevées. En deçà, la précision des horloges et chronomètres ne permettait pas de détecter la dilatation des durées.

18 Expérience de Bertozzi

1. a. Le travail $W(\vec{F})$ d'une force électrique \vec{F} vaut :

$$W(\vec{F}) = q \cdot U$$

On peut dire que des joules sont homogènes à des coulombs multipliés par des volts.

L'énergie cinétique \mathcal{E}_c est égale à $\frac{1}{2} m \cdot v^2$.

Donc les joules sont homogènes à des $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$.

$$\sqrt{\frac{e \cdot U}{m}} \text{ s'exprime en } \sqrt{\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}}{\text{kg}}} \text{ soit } \text{m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Cette expression est bien homogène à une vitesse, d'où la formule $v_c = \sqrt{\frac{2e \cdot U}{m}}$.

b.

$U(\text{V})$	$v_c (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
$1,00 \times 10^2$	$5,93 \times 10^6$
$1,00 \times 10^3$	$1,87 \times 10^7$
$1,00 \times 10^4$	$5,93 \times 10^7$
$1,00 \times 10^5$	$1,87 \times 10^8$
$1,00 \times 10^6$	$5,93 \times 10^8$
$1,00 \times 10^7$	$1,87 \times 10^9$

2. Les valeurs expérimentales confirment les prévisions de la mécanique classique pour les plus faibles valeurs de la vitesse des électrons.

3. La limite est la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide, soit $3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
4. La mécanique classique n'est plus utilisable pour les particules dont la valeur de la vitesse est élevée ($v > 0,14 \times c$). Il faut alors travailler en mécanique relativiste.

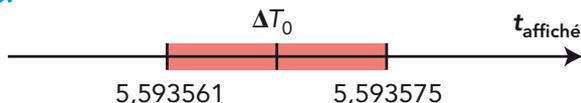
19 Incertitude ou relativité restreinte ?

1. D'après la formule de dilatation des durées, l'écart entre les durées mesurée et propre s'écrit :

$$\Delta T' - \Delta T_0 = (\gamma - 1) \cdot \Delta T_0$$

2. a. $U(\Delta T_0) = 0,0001 \% \times 5,593568 + 0,0014 \times 10^{-3}$
 $U(\Delta T_0) = 7 \times 10^{-6} \text{ s}$

b.



- c. L'écart minimal entre ΔT_0 et $\Delta T'$ doit être :

$$(\Delta T' - \Delta T_0)_{\min} = 7 + 7 + 1 = 15 \mu\text{s}.$$

3. D'après les questions précédentes, il vient :

$$(\gamma - 1) \cdot \Delta T_0 = (\Delta T' - \Delta T_0)_{\min}$$

$$\text{d'où : } \gamma = \frac{(\Delta T' - \Delta T_0)_{\min}}{\Delta T_0} + 1$$

$$\gamma = \frac{15 \times 10^{-6}}{5,593568} + 1 = 1,00000268.$$

Remarque: le résultat est indiqué avec neuf chiffres significatifs pour ne pas trouver une valeur nulle pour v dans la question suivante.

On peut également s'arrêter pour γ à la première décimale non nulle, soit $\gamma = 1,000003$.

4. a. $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$. On en déduit :

$$v = c \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} = 3,00 \times 10^8 \times \sqrt{1 - \frac{1}{1,00000268^2}}$$

$$v = 6,95 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Un tel type de chronomètre est capable de repérer la dilatation des durées en relativité restreinte si les deux chronomètres se déplacent l'un par rapport à l'autre dans des référentiels galiléens avec une vitesse de valeur au moins égale à $6,95 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

b. Un avion se déplace à une vitesse très inférieure à $6,95 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Deux amis, l'un immobile sur Terre et l'autre dans l'avion, ne peuvent pas mettre en évidence la dilatation du temps avec ce type de chronomètre.

5. La précision d'une horloge atomique permet de mettre en évidence la dilatation du temps pour des valeurs de vitesses relatives entre les deux horloges beaucoup plus faibles que $6,95 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

20 Quand les durées se dilatent

1. Pour mesurer une durée propre, l'observateur muni d'un chronomètre doit être proche des deux événements dont il mesure la durée qui les sépare. L'observateur O_1 est proche du départ de la lumière du miroir inférieur et de son retour. Il mesure donc une durée propre.

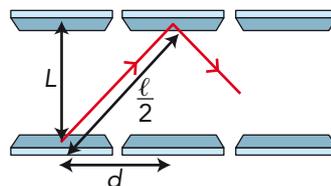
2. a. Pour O_1 , fixe par rapport à l'horloge de lumière, la lumière parcourt la distance $2L$ lors d'un aller-retour.

b. La valeur c de la vitesse de la lumière étant constante, on a :

$$c = \frac{2L}{\Delta T_0} \quad \text{soit } L = \frac{c \cdot \Delta T_0}{2}$$

3. a. Pendant une aller simple de la lumière, l'astronaf parcourt la distance $d = \frac{v \cdot \Delta T'}{2}$.

b.



c. Le schéma fait apparaître un triangle rectangle pour lequel $\left(\frac{\ell}{2}\right)^2 = d^2 + L^2$, soit :

$$\ell = 2\sqrt{d^2 + L^2}$$

4. a. $\ell = c \cdot \Delta T'$

b. On a : $\ell = c \cdot \Delta T'$ (1)

$$\ell = 2\sqrt{d^2 + L^2} \quad (2)$$

$$L = \frac{c \cdot \Delta T_0}{2} \quad (3)$$

$$d = \frac{v \cdot \Delta T'}{2} \quad (4)$$

Avec (1) et (2), on peut écrire :

$$c \cdot \Delta T' = 2\sqrt{d^2 + L^2}$$

En remplaçant L et d par leurs expressions, il vient :

$$c \cdot \Delta T' = 2\sqrt{\left(\frac{v \cdot \Delta T'}{2}\right)^2 + \left(\frac{c \cdot \Delta T_0}{2}\right)^2}$$

En élevant au carré :

$$c^2 \cdot \Delta T'^2 = v^2 \cdot \Delta T'^2 + c^2 \cdot \Delta T_0^2$$

$$c^2 \cdot \Delta T_0^2 = (c^2 - v^2) \cdot \Delta T'^2$$

$$\Delta T' = \sqrt{\frac{c^2}{c^2 - v^2}} \cdot \Delta T_0 = \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot \Delta T_0$$

$$\Delta T' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot \Delta T_0 = \gamma \cdot \Delta T_0 \quad \text{avec } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

5. $v < c$, donc $\frac{v}{c} < 1$.

v et c sont des valeurs positives, donc $\left(\frac{v}{c}\right)^2 < 1$.

On en déduit que $1 - \frac{v^2}{c^2} < 1$, d'où :

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} > 1, \quad \text{donc } \gamma > 1$$

$\Delta T'$ est donc toujours supérieur à ΔT_0 , d'où le titre « Quand les durées se dilatent ».

21 Chérie, j'ai rétréci la navette

1. Bill muni d'un chronomètre est situé dans un référentiel galiléen. Il mesure la durée séparant les événements E_1 et E_2 qui se déroulent au-dessus de sa tête, donc proches de lui. Il mesure une durée propre.

2. $L_2 = v \cdot \Delta T_0$ et $L_1 = v \cdot \Delta T'$

3. $\Delta T' = \gamma \cdot \Delta T_0$

$$L_2 = v \cdot \frac{\Delta T'}{\gamma} = \frac{L_1}{\gamma}$$

4. a. La navette est immobile dans un référentiel lié à Boule. C'est donc ce dernier qui mesure une longueur propre nommée ici L_1 .

b. La longueur L_2 , mesurée par Bill, est plus petite que la longueur L_1 , mesurée par Boule, car $L_2 = \frac{L_1}{\gamma}$ et $\gamma > 1$. Les longueurs se contractent.

5. Longueur de la navette mesurée par Bill :

$$L_2 = \frac{L_1}{\gamma} = L_1 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = L_1 \cdot \sqrt{1 - \frac{(0,90)^2}{1}}$$

$$L_2 = 30 \times \sqrt{1 - 0,90^2} = 13 \text{ m.}$$

La longueur de la navette mesurée par Bill est de 13 m.

22 How GPS bends time ?

Traduction du texte :

« Einstein savait de quoi il parlait à propos de cette histoire de relativité. Pour preuve, il suffit de regarder votre GPS. Le système de positionnement global repose sur un ensemble de 24 satellites qui transmettent des informations horodatées sur l'endroit où ils sont. Votre appareil GPS enregistre l'heure exacte à laquelle il reçoit cette information depuis chaque satellite et calcule ensuite la durée mise par le signal pour arriver. En multipliant le temps écoulé par la vitesse de la lumière, on peut trouver la distance qui le sépare de chaque satellite, comparer ces distances, et calculer sa propre position. Pour une exactitude de quelques mètres, les horloges atomiques des satellites doivent être extrêmement précises – plus ou moins 10 nanosecondes. C'est ici que les choses deviennent étranges : ces horloges, extrêmement précises, ne semblent jamais fonctionner correctement. Une seconde mesurée sur le satellite ne correspond jamais à une seconde mesurée sur Terre – tout comme l'avait prédit Einstein.

Selon la théorie de la relativité restreinte d'Einstein, une horloge qui se déplace rapidement semble fonctionner plus lentement pour une personne immobile. Les satellites se déplacent à environ 9000 miles par heure – suffisamment pour que les horloges embarquées ralentissent de 8 microsecondes par jour par rapport à un récepteur GPS et brouillent totalement les données de localisation. Pour contrer cet effet, le système GPS ajuste l'heure indiquée par les satellites en utilisant l'équation ci-dessous. »

1. Le GPS d'une voiture, par exemple, enregistre l'heure à laquelle il reçoit un signal provenant d'un des 24 satellites. Connaissant le temps de parcours du signal et sa vitesse de propagation, le GPS calcule la distance qui le sépare du satellite. Il effectue cette opération avec plusieurs satellites afin de déterminer sa position exacte sur Terre.

2. La distance qui sépare le GPS d'un satellite est d'autant plus précise que la durée du parcours de l'onde électromagnétique est déterminée avec une grande précision. Il faut des horloges très précises, des horloges atomiques.

3. La relativité restreinte d'EINSTEIN explique que les horloges embarquées dans les satellites battent à un rythme plus lent qu'une horloge terrestre, d'où un décalage (retard) de 8 μ s par jour.

4. Les valeurs des vitesses apparaissent sous forme de rapport dans l'équation de dilation des durées. Il suffit donc que ces valeurs aient la même unité, des miles par seconde par exemple.

Si l'horloge d'un satellite GPS mesure une durée propre de 24 h, $\Delta T_0 = 24 \times 3600$ s. Une horloge terrestre mesure :

$$\Delta T' = \gamma \cdot \Delta T_0 = \frac{24 \times 3600}{\sqrt{1 - \frac{\left(\frac{9000}{3600}\right)^2}{186262^2}}} = 86400,0000078 \text{ s,}$$

soit une avance de 7,8 μ s par rapport à l'horloge embarquée dans le satellite. Inversement, l'horloge du satellite affiche un retard de 7,8 μ s par rapport à une horloge terrestre.

Pour aller plus loin

23 Le test des étoiles doubles

1. Le postulat d'EINSTEIN pour la relativité restreinte dit que la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide est la même dans tous les référentiels galiléens.

2. D'après la loi classique de composition des vitesses, la personne fixe dans un référentiel terrestre voit la balle lancée par l'enfant A arriver avec une vitesse dont la valeur v_1 est égale à celle v_A du lancer de l'enfant par rapport au manège plus celle v_m du manège par rapport au sol ($v_1 = v_A + v_m$).

Au contraire, la balle provenant de l'enfant B arrive vers la personne avec une vitesse de valeur $v_2 = v_A - v_m$. C'est donc la balle provenant de l'enfant A qui arrive en premier à la personne.

3. Les effets relativistes ne se font sentir que pour des valeurs de vitesse non négligeables devant c . La loi classique de composition des vitesses s'applique donc ici pour les balles.

4. N'ayant pas observé d'images brouillées lors de l'expérience, on peut conclure que, dans le référentiel de l'observateur terrestre, la lumière émise par chaque étoile s'est propagée à une vitesse ayant la même valeur dans le vide. Le postulat d'EINSTEIN est en accord avec ces observations.

24 Le test des pions

1. La source des photons gamma sont les pions neutres.

2. Dans (R), les pions neutres se déplacent à une vitesse de valeur égale à $0,99975 \times c$.

3. a. En construisant les deux vecteurs $\vec{v}_{\text{photon/source}}$ et $\vec{v}_{\text{source/Terre}}$, avec, ici, des vecteurs colinéaires de même sens, on obtient une valeur de $1,99975 \times c$ pour $\vec{v}_{\text{photon/Terre}}$.

b. De même, les vecteurs étant colinéaires et de sens opposés, on obtient une valeur de $0,00025 \times c$ pour $\vec{v}_{\text{photon/Terre}}$.

4. a. ALVÄGER mesure la valeur d'une vitesse avec une précision de $10^{-5} \times c$. L'expérience donne une valeur de c pour $\vec{v}_{\text{photon/Terre}}$, ce qui est en désaccord avec la mécanique classique. En effet, les résultats de la question 3 montrent que l'on aurait dû obtenir des valeurs bien différentes de c .

b. Cette expérience est en accord avec l'invariance de la valeur c de la vitesse de la lumière dans le vide. Elle n'infirme pas la théorie de la relativité restreinte.

25 La quantité de mouvement relativiste

1. Si $v \ll c$, alors $\frac{v^2}{c^2} \approx 0$ et γ tend vers 1 ;

$$\vec{p}_{\text{relat.}} = m \cdot \vec{v}$$

On retrouve l'expression classique de la quantité de mouvement.

2. En remplaçant $p_{\text{relat.}}$ et $p_{\text{clas.}}$ par leurs expressions, on peut écrire :

$$\gamma \cdot m \cdot v - m \cdot v \leq \frac{m \cdot v}{100}$$

Il vient : $\gamma \leq \frac{1}{100} + 1$ et $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \geq \frac{100}{101}$

d'où : $v \leq c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{100}{101}\right)^2} = 0,14 \times c = v_{\text{max}}$

Si $v \leq v_{\text{max}} = 0,14 \times c$, les quantités de mouvement en mécanique relativiste et en mécanique newtonienne diffèrent d'au plus 1 %.

26 L'énergie relativiste

1. En combinant les relations proposées, on a :

$$\mathcal{E}^2 = \gamma^2 \cdot m^2 \cdot v^2 \cdot c^2 + m^2 \cdot c^4 = \gamma^2 \cdot m^2 \cdot c^4 \left(\frac{v^2}{c^2} + \frac{1}{\gamma^2} \right)$$

$$\mathcal{E}^2 = \gamma^2 \cdot m^2 \cdot c^4 \left(\frac{v^2}{c^2} + \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \right) = \gamma^2 \cdot m^2 \cdot c^4$$

Il vient : $\mathcal{E} = \gamma \cdot m \cdot c^2$

2. $\mathcal{E} = \gamma \cdot m \cdot c^2 = \mathcal{E}_c + \mathcal{E}_0 = \mathcal{E}_c + m \cdot c^2$

Donc : $\mathcal{E}_c = \gamma \cdot m \cdot c^2 - m \cdot c^2 = (\gamma - 1) \cdot m \cdot c^2$

3. a. Si la particule a une masse nulle, alors :

$$\frac{\mathcal{E}}{\gamma} = m \cdot c^2 = 0$$

b. Comme l'énergie d'une particule a une valeur finie, γ tend vers l'infini.

c. Si γ tend vers l'infini, $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ tend vers 0,

donc $\frac{v^2}{c^2}$ tend vers 1 et $v = c$.

La valeur de la vitesse de ces particules de masse nulle est égale à c dans le vide.

4. a. $\mathcal{E} = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$.

b. L'énergie relativiste d'une particule de masse m a pour expression :

$$\mathcal{E}^2 = p^2 \cdot c^2 + m^2 \cdot c^4$$

Pour un photon de masse nulle, cette énergie s'écrit :

$$\mathcal{E} = p \cdot c$$

c. Pour un photon : $p = \frac{\mathcal{E}}{c} = \frac{h}{\lambda}$.

C'est l'expression de de Broglie (voir le chapitre 15).

Retour sur l'ouverture du chapitre

27 La vitesse de la lumière et EINSTEIN dépassés par une particule ?

1. Le postulat d'EINSTEIN indique que la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide est la plus grande valeur de vitesse que l'on puisse atteindre.

2. a. Un neutrino est une particule neutre de masse pratiquement nulle.

b. Temps mis par la lumière pour parcourir cette distance :

$$\Delta t = \frac{d}{c} = \frac{730\,085}{2,997\,924\,58 \times 10^8} = 2,435\,30 \times 10^{-3} \text{ s.}$$

Un neutrino met $\Delta t = \Delta T' - 60 \text{ ns} = 2,435\,24 \times 10^{-3} \text{ s}$ pour parcourir cette distance.

c. Incertitude de 10 milliardièmes de seconde sur Δt , donc $U(\Delta t) = 1 \times 10^{-8} \text{ s}$.

$$2,435\,23 \times 10^{-3} \text{ s} < \Delta t < 2,435\,25 \times 10^{-3} \text{ s}$$

3. $v = \frac{d}{\Delta t} = \frac{730\,085}{2,435\,24 \times 10^{-3}} = 2,998\,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$U(v) = v \cdot \sqrt{\left(\frac{U(d)}{d}\right)^2 + \left(\frac{U(\Delta t)}{\Delta t}\right)^2}$$

$$= 2,998\,00 \times 10^8 \times \sqrt{\left(\frac{1}{730\,085}\right)^2 + \left(\frac{10^{-8}}{2,435\,24 \times 10^{-3}}\right)^2}$$

$$= 1,3 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$2,997\,99 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} < v < 2,998\,01 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

4. Avec la précision de la mesure, la valeur de la vitesse du neutrino est bien supérieure à celle de la vitesse de la lumière dans le vide.

5. D'après EINSTEIN :

$$\Delta T' = \Delta T_0 \quad \text{avec} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Or, si $v > c$, alors $1 - \frac{v^2}{c^2} < 0$,

donc $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ n'existe pas.

γ ne peut pas être calculé. La relativité restreinte est remise en cause.

6. Une découverte expérimentale doit être vérifiée par plusieurs mesures avec des méthodes et des instruments différents pour être validée.

Comprendre un énoncé

28 Je suis en retard! en retard! en retard!

1. La valeur de la vitesse relative du Lapin n'est pas négligeable devant c : des effets relativistes vont avoir lieu. Les durées mesurées par le Lapin et la Reine sont ainsi liées par la relation de dilatation des durées. Puisque, ici, $\gamma \approx 2,3$, la Reine mesure une durée plus grande que le Lapin, d'où son courroux.
2. Alice n'est pas en mouvement par rapport à la Reine ; elle mesure la même durée qu'elle. Autrement

dit, entre Alice et la Reine, $\gamma = 1$. Il n'y a pas de dilatation des durées et Alice ne contredira pas la Reine.

3. Pour éviter de courroucer la Reine, il faut un décalage minimal entre la durée propre et la durée mesurée. Ceci est possible si la valeur de la vitesse relative v devient négligeable devant c ($v < 0,14 \times c$). Dans ce cas, γ tend vers 1 et $\Delta T'$ tend vers ΔT_0 . Le lapin aurait mieux fait de ne pas aller si vite !
4. Grâce à ce type d'horloge, le Lapin mesurera le temps très précisément, ce qui peut l'aider à gérer ses retards. Cependant, les effets relativistes comme la dilatation des durées affectent toutes les horloges.

Temps et évolution chimique : cinétique et catalyse

Chapitre

9

Activités

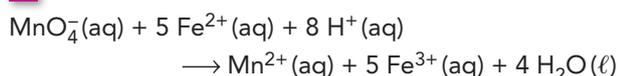
1 Réactions rapides, réactions lentes... (p. 230)

Matériel et produits

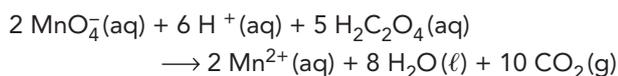
- Deux béchers de 50 mL ;
- deux éprouvettes graduées de 10 mL ;
- deux pipettes graduées de 5 mL ;
- une solution de sulfate de fer (II), $\text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + \text{SO}_4^{2-}(\text{aq})$ à $1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;

- une solution d'acide oxalique $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4(\text{aq})$ à $5,0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- deux solutions acidifiées de permanganate de potassium $\text{K}^+(\text{aq}) + \text{MnO}_4^-(\text{aq})$ à $1,0 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

1 Dans le bécher A :



Dans le bécher B :



2 La première est la plus rapide ; c'est dans le bécher A que la coloration violette disparaît le plus rapidement.

3 Les deux réactions ont des cinétiques différentes, car l'évolution dans le temps des deux systèmes où elles se déroulent est différente ; celle-ci est rapide pour le système A, lente pour le système B.

2 Facteurs cinétiques (p. 230-231)

A Influence des concentrations

Matériel et produits

- Des béchers identiques de 100 mL ;
- des éprouvettes graduées de 15 et 25 mL ;
- un chronomètre ;
- des solutions de thiosulfate de sodium $2 \text{Na}^+(\text{aq}) + \text{S}_2\text{O}_3^{2-}(\text{aq})$: la première à $0,5 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, la deuxième à $1,0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et la troisième à $5,0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- des solutions d'acide chlorhydrique $\text{H}^+(\text{aq}) + \text{Cl}^-(\text{aq})$: la première à $0,5 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, la deuxième à $1,0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et la troisième à $5,0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Protocole possible

Étude de l'influence de la concentration du thiosulfate de sodium

Disposer sur la paillasse trois papiers portant exactement la même lettre ou le même signe.

Dans trois béchers numérotés (I), (II) et (III), introduire 10 mL de solutions de thiosulfate de sodium $2 \text{Na}^+(\text{aq}) + \text{S}_2\text{O}_3^{2-}(\text{aq})$, à $0,5 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (bécher (I)), à

$1,0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (bécher (II)) et à $5,0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (bécher (III)).

Déposer chaque bécher sur l'une des trois lettres.

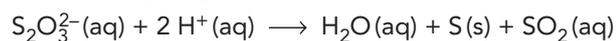
Au même instant, et en déclenchant le chronomètre, verser dans chacun des béchers 25 mL de solution d'acide chlorhydrique, $\text{H}^+(\text{aq}) + \text{Cl}^-(\text{aq})$, à $5,0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Se placer à la verticale des béchers et relever, pour chaque bécher, le temps au bout duquel la lettre n'est plus visible.

Étude de l'influence de la concentration de l'acide chlorhydrique

Recommencer en mettant dans les béchers 25 mL de chacune des solutions d'acide chlorhydrique et verser simultanément, dans les trois béchers, 10 mL de solution de thiosulfate de sodium $2 \text{Na}^+(\text{aq}) + \text{S}_2\text{O}_3^{2-}(\text{aq})$, à $5,0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

1 Pour la réaction entre les ions thiosulfate $S_2O_3^{2-}(aq)$ et les ions hydrogène $H^+(aq)$ d'équation :



le système évolue d'autant plus rapidement que la

concentration en ions thiosulfate $S_2O_3^{2-}(aq)$ ou en ions hydrogène $H^+(aq)$ est élevée.

Si ce résultat est général, on peut conclure : l'évolution d'un système chimique est d'autant plus rapide que les concentrations des réactifs sont élevées.

B Influence de la température

Matériel et produits

- Des béchers identiques de 100 mL ;
- des éprouvettes graduées de 15 et 25 mL ;
- un chronomètre ;
- un bain-marie à 50 °C ;
- un thermomètre ;
- une solution d'acide oxalique $H_2C_2O_4(aq)$ à $5,0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot L^{-1}$;
- une solution acidifiée de permanganate de potassium $K^+(aq) + MnO_4^-(aq)$ à $1,0 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot L^{-1}$;
- de la glace pilée.

Protocole possible

Dans trois béchers numérotés (I), (II) et (III), introduire 10 mL de solution acidifiée de permanganate de potassium $K^+(aq) + MnO_4^-(aq)$ à $1,0 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot L^{-1}$.

Laisser le bécher (I) à température ambiante, mettre le bécher (II) dans la glace pilée et le bécher (III) au bain-marie à 50 °C.

Dans trois béchers numérotés (I'), (II') et (III'), introduire 10 mL de solution d'acide oxalique $H_2C_2O_4(aq)$ à $5,0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot L^{-1}$.

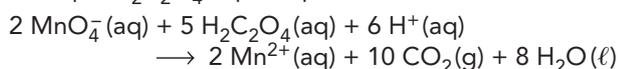
Laisser le bécher (I') à température ambiante, mettre le bécher (II') dans la glace pilée et le bécher (III') au bain-marie à 50 °C.

En déclenchant le chronomètre, verser le bécher (I') dans le bécher (I) ; agiter et observer. Relever le temps lorsque la décoloration est complète.

Vérifier que les contenus des béchers (II) et (II') ont sensiblement la même température et verser le bécher (II') dans le bécher (II) ; agiter et observer. Relever le temps lorsque la décoloration est complète.

Recommencer avec les béchers (III) et (III').

2 L'étude, à diverses températures, de la réaction entre les ions permanganate $MnO_4^-(aq)$ et l'acide oxalique $H_2C_2O_4(aq)$ d'équation :



montre que le système évolue d'autant plus rapidement que sa température est élevée.

Si ce résultat est général, on peut conclure : l'évolution d'un système chimique est d'autant plus rapide que sa température est élevée.

C Influence des catalyseurs

Matériel et produits

- Des béchers identiques de 100 mL ;
- des éprouvettes graduées de 25 mL ;
- un cylindre de platine utilisé pour la désinfection et le nettoyage des lentilles cornéennes ;
- une solution de peroxyde d'hydrogène H_2O_2 à 30 volumes ;
- une solution de chlorure ou de sulfate de fer (III) à $0,5 \text{ mol} \cdot L^{-1}$;
- des morceaux de foie découpés en dés.

3 Le dégagement de dioxygène est faible dans le bécher A, car la réaction étudiée est très lente.

4 Le platine, les ions fer (III) et la catalase accélèrent la réaction étudiée, ce sont des catalyseurs.

5 Un catalyseur est une espèce qui accélère une réaction chimique sans être consommée par celle-ci ; sa formule n'apparaît donc pas dans l'équation de la réaction.

Une réaction catalysée est une réaction qui est accélérée par l'ajout d'un catalyseur.

La catalyse est hétérogène si le catalyseur et au moins un des réactifs ne sont pas dans la même phase.

La catalyse est homogène si le catalyseur et tous les réactifs sont dans la même phase.

La catalyse est enzymatique si le catalyseur est une enzyme.

6 Exemples d'applications de la catalyse dans la vie quotidienne : pot d'échappement catalytique pour purifier les gaz d'échappement (voir exercice 22, p. 248 du manuel) ; colles ou adhésifs nécessitant l'ajout d'un durcisseur (voir exercice 27, p. 251 du manuel) ; nettoyage de lentilles cornéennes ; etc.

7 Exemple de catalyse enzymatique dans le cours de SVT : se reporter entre autres dans le programme de 1^{re} S au thème : « Des protéines actives dans la catalyse : les enzymes ».

3 Suivi temporel d'une synthèse organique par CCM (p. 232)

Matériel et produits

- Un montage de chauffage à reflux avec ballon bicol ;
- des plaques à chromatographie de 4 cm × 6 cm et une cuve adaptée ;
- des capillaires ;
- une lampe UV ;
- des éprouvettes graduées de 10 mL, 25 mL et 100 mL ;
- une pipette jaugée de 2,0 mL ;
- un chronomètre ;
- une solution de soude à 0,25 mol · L⁻¹ ;
- une solution de permanganate de potassium à 0,25 mol · L⁻¹ ;
- du benzaldéhyde pur ;
- du cyclohexane ;
- de la propanone.

Compléments

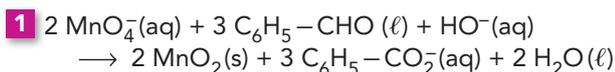
La réaction étudiée est relativement rapide. Aussi doit-on effectuer rapidement les premiers prélèvements pour chromatographie afin de repérer correctement les taches dues au benzaldéhyde.

Afin de pouvoir parler de la durée de la réaction à une température donnée, nous nous sommes placés à l'ébullition du mélange, ce qui explique une durée de réaction assez brève (inférieure à dix minutes).

Si l'on souhaite allonger la durée de la réaction, on pourra travailler à une température plus basse, mais il faut alors disposer d'agitateurs magnétiques chauffants avec turbulents ovoïdes pour bien homogénéiser le mélange qui contient entre autres du dioxyde de manganèse solide.

On peut aussi partir avec un mélange réactionnel contenant, à température ambiante, tous les réactifs dès le départ et chauffer jusqu'à ébullition ; la manipulation est plus facile à conduire, mais le temps de réaction alors trouvé ne peut être rapporté à une température donnée, ce qui peut être gênant après étude du facteur cinétique température.

Afin d'avoir des résultats pertinents, il faut que le benzaldéhyde soit le plus pur possible ; en effet, cet aldéhyde s'oxyde facilement en acide benzoïque, en présence de lumière sous l'action du dioxygène de l'air. Il suffit de faire une chromatographie du réactif pour vérifier qu'il n'a pas déjà été oxydé.



2 On a $n(\text{MnO}_4^-) = C \cdot V = 15 \text{ mmol}$.

$$n(\text{C}_6\text{H}_5-\text{CHO}) = V \cdot \frac{\rho}{M} = \frac{2 \times 1,042}{106,1} = 19,6 \text{ mmol}.$$

Il y aurait stœchiométrie si :

$$n(\text{MnO}_4^-) = \frac{2 \times n(\text{C}_6\text{H}_5-\text{CHO})}{3} = 13,1 \text{ mmol}.$$

Les ions permanganate sont donc en excès et le benzaldéhyde est le réactif limitant.

3 On peut considérer, vu la température du milieu réactionnel, que l'on effectue une trempe du mélange contenu dans la goutte prélevée et que l'on bloque son évolution.

4 Lorsque l'on a effectué cette manipulation, on a constaté que les premiers dépôts donnaient, après révélation, deux taches, l'une due au benzaldéhyde $\text{C}_6\text{H}_5-\text{CHO}$ et l'autre due à l'ion carboxylate $\text{C}_6\text{H}_5-\text{CO}_2^-$. Les derniers dépôts ne donnaient, après révélation, que la tache due à l'ion carboxylate $\text{C}_6\text{H}_5-\text{CO}_2^-$.

Une étude soignée des taches obtenues montrent que celles dues au benzaldéhyde ont une taille qui diminue dans le temps, alors que celles dues à l'ion carboxylate ont une taille qui croît, puis qui est constante lorsque n'apparaît plus la tache due au benzaldéhyde.

Cette évolution traduit la disparition progressive du benzaldéhyde par oxydation en ion carboxylate.

5 a. La tache relative au benzaldéhyde n'a plus semblé être détectable au-delà de dix à douze minutes dans les conditions de cette manipulation. Le système n'évoluait donc plus au-delà de cette durée.

b. Pour améliorer la précision de cette mesure on pourrait :

- augmenter le nombre de prélèvements en les resserrant dans le temps ;
- utiliser d'autres techniques d'analyse (spectroscopie IR ou de RMN).

6 La durée d'une réaction chimique est le temps nécessaire à la consommation totale du réactif limitant.

4 Suivi temporel d'une réaction par spectrophotométrie (p. 233)

Matériel et produits

- Un erlenmeyer de 150 mL ;
- des éprouvettes graduées de 10 mL et 25 mL ;
- une pipette jaugée de 5,0 mL ;
- un spectrophotomètre et ses cuves ;
- une solution d'iodure de potassium $\text{K}^+ (\text{aq}) + \text{I}^- (\text{aq})$ à 0,50 mol · L⁻¹ ;
- une solution d'acide sulfurique $2 \text{H}^+ (\text{aq}) + \text{SO}_4^{2-} (\text{aq})$ à 2,0 mol · L⁻¹ ;
- une solution de peroxyde d'hydrogène $\text{H}_2\text{O}_2 (\text{aq})$ à $5,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

A Réaction étudiée ; méthode d'étude

- 1 a.** Cette réaction est une réaction lente.
b. $\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq}) + 2 \text{I}^-(\text{aq}) + 2 \text{H}^+(\text{aq}) \rightarrow \text{I}_2(\text{aq}) + 2 \text{H}_2\text{O}(\text{aq})$
c. Les ions hydrogène $\text{H}^+(\text{aq})$ figurent dans le premier membre de l'équation, ce sont des réactifs et ce ne sont donc pas des catalyseurs de cette réaction.
- 2 a.** Les molécules de diiode $\text{I}_2(\text{aq})$ (ou plus exactement les ions $\text{I}_3^-(\text{aq})$ formés par la réaction d'équation

$\text{I}_2(\text{aq}) + \text{I}^-(\text{aq}) \rightarrow \text{I}_3^-(\text{aq})$ sont responsables de la couleur de la solution.

b. Le peroxyde d'hydrogène est le réactif limitant ; sa disparition s'accompagne de la formation de diiode. D'après la loi de Beer-Lambert, l'absorbance de la solution est proportionnelle à la concentration du diiode, on peut donc suivre l'évolution du système par spectrophotométrie.

B Manipulation

- 3 a.** Le graphe est tracé dans le manuel (doc. 17, p. 239).
b. Graphiquement, on obtient $A_f \approx 1,10$.
c. Sur le graphe, on lit $t_f \approx 15$ min.
- 4** Au chapitre 4 (activité 1, p. 88 du manuel), le spectre du diiode est fourni. On constate qu'il présente un maximum pour $\lambda \approx 400$ nm, c'est-à-dire dans le violet, couleur complémentaire de celle du diiode (jaune), d'où la valeur choisie pour le tracé.
- 5** Loi de Beer-Lambert : $A(\lambda) = \varepsilon_\lambda \cdot \ell \cdot C$.
- 6 a.** $n(\text{H}_2\text{O}_2) = 0,25$ mmol ; $n(\text{I}^-) = 2,5$ mmol ; $n(\text{H}^+) = 80$ mmol.
Le peroxyde d'hydrogène est le réactif limitant. Un tableau d'avancement donne $n(\text{I}_2) = x$ et donc :

$$[\text{I}_2] = \frac{x}{V}$$

b. Pour le peroxyde d'hydrogène, $n(\text{H}_2\text{O}_2) = n_0 - x$, d'où :

$$x_{\max} = n_0 \quad \text{et} \quad [\text{I}_2]_{\max} = \frac{x_{\max}}{V} = \frac{n_0}{V}$$

7 À tout instant $A(t) = \varepsilon_\lambda \cdot \ell \cdot [\text{I}_2]$, soit $A(t) = \varepsilon_\lambda \cdot \ell \cdot \frac{x(t)}{V}$.

Pour $t = t_f$, $A(t_f) = A_f = \frac{\varepsilon_\lambda \cdot \ell \cdot n_0}{V}$, d'où :

$$\frac{A(t)}{A_f} = \frac{x}{n_0}$$

- 8 a.** Graphiquement, on a trouvé $t_{1/2} \approx 2$ min.
b. Il faut utiliser les formules et le tableau (fiche 3, p. 584 du manuel) pour déterminer σ_{n-1} , k et $U(t_{1/2})$ avec un niveau de confiance de 95 %.
c. $t_f \approx 8 t_{1/2}$. Le temps de demi-réaction, plus facile à déterminer que la durée de réaction, est un bon indicateur de celle-ci : généralement la durée d'une réaction est de l'ordre de quelques temps de demi-réaction.

Exercices (p. 241-253)

QCM

- 1** 1. B et C ; 2. A et C ; **2** 1. C ; 2. A et C ; 3. B ;
3 1. A et C ; 2. A et C ; 3. A ; **4** 1. A et B ; 2. A ; 3. A et C.

Application immédiate

5 Déterminer une durée de réaction

1. $t_f = 250$ min.
2. $t_{1/2} \approx 30$ min ; $t_f \approx 8 t_{1/2}$.
3. $m = [\text{Cu}^{2+}] \cdot V \cdot M(\text{Cu}) = 0,95$ g.

6 Étudier des facteurs cinétiques

1. Facteurs cinétiques mis en évidence : température et catalyseur.
2. (a) : β ; (b) : γ et (c) : α .

Pour commencer

7 Classer des réactions chimiques

- (1) : rapide ; (2) : instantanée ; (3) : lente ; (4) : évolution ; (5) : inerte ; (6) : rapide ; (7) : instantanée.

8 Analyser des facteurs cinétiques

1. Au cours du temps, la concentration des réactifs diminue ; pour chacun des mélanges, on constate que :

$$\Delta n_1 > \Delta n_2 > \Delta n_3, \quad \text{soit} \quad \Delta C_1 > \Delta C_2 > \Delta C_3$$

La rapidité d'évolution des systèmes diminue lorsque la concentration des réactifs diminue.

2. $\theta(\text{II}) > \theta(\text{I})$. Or, $\Delta n(\text{II})_i > \Delta n(\text{I})_i$,
soit :

$$\Delta C(\text{II})_i > \Delta C(\text{I})_i$$

La rapidité d'évolution d'un système est d'autant plus élevée que sa température est élevée.

9 Repérer des facteurs cinétiques

1. a. Le facteur cinétique mis en évidence est la température.

b. La recommandation « À conserver au frais » est justifiée, car la réaction est d'autant plus rapide que la température est élevée.

2. Aucun délai d'utilisation ne figure sur les flacons d'eau de Javel à 12 °C, car, comme l'indique la courbe verte, la réaction est alors très lente pour cette solution diluée. Le facteur cinétique mis en évidence est donc la concentration du réactif, ici, l'ion hypochlorite.

3. a. L'eau de Javel est commercialisée dans des récipients opaques, car la réaction est accélérée en présence de radiations UV (réaction photochimique).

b. Le facteur cinétique mis en évidence est l'éclaircissement.

c. La recommandation « À conserver à l'abri de la lumière » est en accord avec cette observation.

10 Justifier une méthode expérimentale

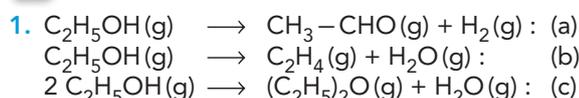
Lors d'une trempe, on exploite deux facteurs cinétiques : la température et la concentration ; l'évolution du système est en effet bloqué par un fort abaissement de la température et par la dilution qui diminue fortement la concentration des réactifs.

11 Identifier un catalyseur

1. Les ions hydrogène $H^+(aq)$ ne figurent pas dans l'équation de déshydratation du propan-1-ol alors qu'ils apparaissent dans le premier membre de l'équation, entre les ions iodate et iodure.

2. Dans la première réaction, ce sont des catalyseurs ; dans la seconde, ce sont des réactifs.

12 Repérer des catalyseurs



Le cuivre, l'alumine et l'acide sulfurique favorisent les réactions sans participer aux équations des réactions : ce sont des catalyseurs.

2. (a) et (b) : catalyse hétérogène ; (c) : catalyse homogène.

3. Sélectivité des catalyseurs.

13 Déterminer une durée de réaction et un temps de demi-réaction (I)

1. Le chloroéthane est le réactif limitant.

2. a. $t_f \approx 40$ min

b. $t_{1/2} \approx 7,5$ min

14 Déterminer une durée de réaction et un temps de demi-réaction (II)

1. Sur le graphe, on constate que $[Ag^+] \approx 0 \text{ mol} \cdot L^{-1}$ pour $t_f \approx 70$ min.

2. De même, on constate que :

$[Ag^+] \approx \frac{1}{2} [Ag^+]_0 \approx 0,040 \text{ mol} \cdot L^{-1}$ pour $t_{1/2} \approx 10$ min.

On observe que $t_f \approx 7 t_{1/2}$.

Pour s'entraîner

15 De la concentration au temps de demi-réaction

1. On peut suivre l'évolution de cette réaction par spectrophotométrie.

2. Le tracé du graphe $[MnO_4^-(aq)] = f(t)$ est immédiat à l'aide des données du tableau.

3. L'ion permanganate $MnO_4^-(aq)$ est le réactif limitant de cette réaction car il disparaît totalement.

4. a. Sur le graphe, on peut lire :

$$t_f \leq 180 \text{ s} \quad \text{et} \quad t_{1/2} \approx 69 \text{ s.}$$

b. $t_f \approx 2,6 t_{1/2}$; la faible valeur trouvée pour le rapport $\frac{t_f}{t_{1/2}}$ est due au fait que cette réaction est autocatalysée.

16 Utilisation de la colorimétrie

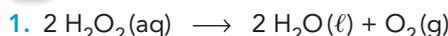
1. On ajoute de l'eau dans les tubes A et B pour que tous les tubes contiennent le même volume de liquide afin de pouvoir comparer la couleur des tubes dans les mêmes conditions.

2.

Concentrations	Tube A	Tube B	Tube C
$[H_2O_2]_0$ (mmol · L ⁻¹)	9,0	15,0	27,0
$[I^-]$ (mol · L ⁻¹)	0,12	0,12	0,12

3. La concentration du peroxyde d'hydrogène est le facteur cinétique mis en évidence.

17 Utilisation de la volumétrie



2. a. $x(t) = n(O_2)(t) = V(O_2)(t)/V_m$

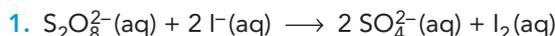
b. À l'aide d'un tableau d'avancement, il vient :

$$n(H_2O_2)(t) = n(H_2O_2)(0) - 2x(t), \quad \text{d'où :}$$

t (min)	0	5	10	15	20	30
V(t) (mL)	0	6,2	10,9	14,6	17,7	21,0
x(t) = n(O ₂)(t) (mmol)	0	0,26	0,45	0,61	0,74	0,88
n(H ₂ O ₂)(t) (mmol)	2,00	1,48	1,10	0,78	0,52	0,24

3. $t_{1/2} \approx 12$ min

18 Exploitation de l'avancement



2. Le diiode étant la seule espèce colorée, l'évolution du système peut être suivie par spectrophotométrie.

3. a. Tableau d'avancement :

	$S_2O_8^{2-}(aq) + 2 I^-(aq) \longrightarrow 2 SO_4^{2-}(aq) + I_2(aq)$		
Quantités initiales	$n_0(S_2O_8^{2-})$	$n_0(I^-)$	0
Quantités à t	$n_0(S_2O_8^{2-}) - x$	$n_0(I^-) - 2x$	x

b. Les ions peroxydisulfate constituent le réactif limitant :

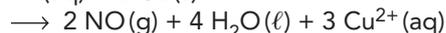
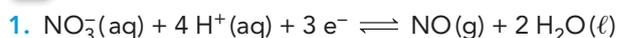
$$x(t) = n_0(S_2O_8^{2-}) - n(S_2O_8^{2-})$$

t (min)	0	2,5	5	10	15	20	25	30
n(S ₂ O ₈ ²⁻)(mmol)	10,0	9,0	8,3	7,05	6,15	5,4	4,9	4,4
x(t) (mmol)	0	1,0	1,7	2,95	3,85	4,6	5,1	4,6

c. Le tracé de la courbe $x = f(t)$ est immédiat à l'aide des données du tableau.

On en déduit, pour $x = 5,0$ mmol, $t_{1/2} = 24$ min.

19 À chacun son rythme



2. L'ion hydrogène $H^+(aq)$ est l'un des réactifs de la réaction.

3. L'ion hydrogène $H^+(aq)$ n'est pas ici un catalyseur, mais un réactif.

20 Synthèse chlorophyllienne

1. L'éclairement, la température, la concentration du dioxyde de carbone, la présence d'un catalyseur (chlorophylle) sont les facteurs cinétiques évoqués dans ce texte.

2. La photosynthèse est d'autant plus rapide que l'éclairement est intense, la température élevée et la concentration de dioxyde de carbone forte.

3. « La croissance des végétaux est très lente en hiver et très importante en été », car, en hiver, il fait froid et l'éclairement est faible.

21 Designer catalysts

Traduction du texte :

« Catalyseurs biologiques et biomimétiques »

Les enzymes, qui sont des protéines, sont des catalyseurs naturels. Les enzymes accélèrent sélectivement les réactions dont les cellules vivantes ont besoin. Sans enzymes, les plantes ne peuvent pas photosynthétiser les glucides et les animaux ne peuvent pas métaboliser la nourriture qu'ils mangent.

Ces dernières années, il y a eu de nombreux efforts pour réaliser la synthèse de catalyseurs qui peuvent égaler l'efficacité des enzymes naturelles. Appelés catalyseurs biomimétiques car ils imitent les enzymes naturelles, ils utilisent des astuces chimiques de la nature pour accélérer les réactions dans les êtres humains.

Copier Mère Nature

Les enzymes, macromolécules contenant des milliers d'atomes, ont des petits sites catalytiques appelés "cavités" qui constituent des points de fixation pour les réactifs considérés. Les cavités ont exactement la forme de la molécule et contiennent des atomes qui portent des charges appropriées pour attirer et modifier les réactifs. Un catalyseur biomimétique typique est beaucoup plus petit que l'enzyme dont il imite la cavité.

Les chimistes ont réussi à imiter certaines familles d'enzymes trouvées dans les plantes, les animaux et les bactéries. Les catalyseurs biomimétiques peuvent être une solution pour répondre à la croissance des besoins énergétiques terrestres et aux problèmes environnementaux.

Par exemple, certains de ces catalyseurs biomimétiques accélèrent l'addition de groupe hydroxyle à une molécule organique et peuvent être utilisés pour "additionner" OH au méthane, à l'éthane et au propane, principales molécules présentes dans le gaz naturel, et convertir ces molécules en alcools liquides tels que le méthanol, l'éthanol et les propanols qui sont plus faciles à transporter que le gaz naturel.

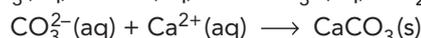
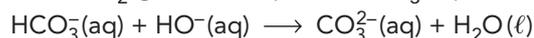
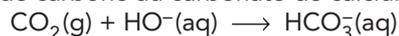
Dans un autre cas, l'enzyme *anhydrase carbonique* est le catalyseur biologique responsable de l'interconversion du dioxyde de carbone CO_2 et de l'ion hydrogénocarbonate HCO_3^- dans les organismes vivants. Les analogues biomimétiques de cette enzyme peuvent être utilisés aujourd'hui pour piéger le dioxyde de carbone de l'air. »

1. Catalyseurs enzymatiques et catalyseurs hétérogènes doivent leur efficacité à la présence d'un grand nombre de sites catalytiques, ils doivent donc avoir une grande surface spécifique.

2. Le mode d'action d'un « *binding pocket* » est présenté au document 13, p. 238 du manuel.

3. Le méthane : CH_4 ; le méthanol : CH_3-OH ;
l'éthane : CH_3-CH_3 ; l'éthanol : CH_3-CH_2-OH ;
le propane : $CH_3-CH_2-CH_3$;
le propan-1-ol : $CH_3-CH_2-CH_2-OH$;
le propan-2-ol : $CH_3-CH(OH)-CH_3$.

4. a. Équations des réactions permettant de passer du dioxyde de carbone au carbonate de calcium :



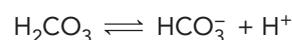
b. On cherche à piéger le dioxyde de carbone, car c'est un gaz à effet de serre et l'accroissement de sa concentration dans l'air contribue au réchauffement climatique.

c. Le carbonate de calcium est solide ; piéger le dioxyde de carbone sous forme de carbonate de calcium réduit très fortement le volume occupé par ce gaz.

5. L'anhydrase carbonique est une *enzyme*, constituée d'une chaîne de 264 acides aminés, présente à la surface plasmique intracellulaire des globules rouges qui favorise l'hydratation du dioxyde de carbone CO_2 en acide carbonique H_2CO_3 , mais aussi la réaction inverse :



L'acide carbonique participe alors à l'équilibre acido-basique suivant :



assurant, par exemple, la libération de protons H^+ dans les reins.

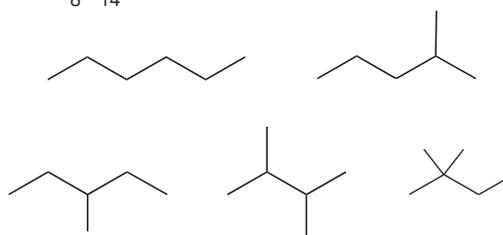
Ces deux réactions permettent de fournir des protons, du dioxyde de carbone et de l'acide carbonique pour leur transport ultérieur à l'intérieur ou à l'extérieur de la cellule. L'anhydrase carbonique participe à des processus physiologiques aussi cruciaux que la respiration, l'homéostasie du pH, la gluconéogenèse ou la résorption des os.

Si l'anhydrase carbonique est déficiente, il est alors possible de suffoquer par empoisonnement au dioxyde de carbone ou souffrir de calcifications cérébrales, rigidité musculaire ou encore de dysfonction rénale.

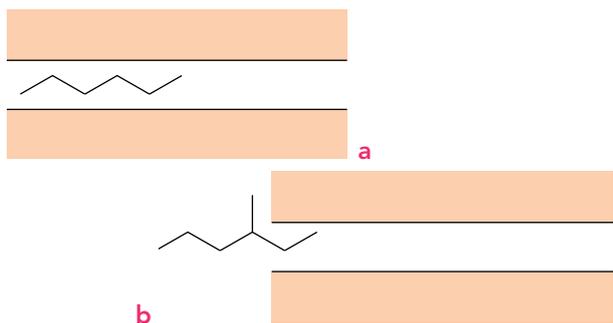
22 La catalyse dans le domaine industriel

1. Zéolithe, du grec *zeo* signifiant « qui bout » et *lithos* signifiant « pierre ». Les zéolithes contiennent de l'eau dans leurs pores ; lorsqu'elles sont chauffées, cette eau bout, d'où leur nom de pierres qui bouillent.

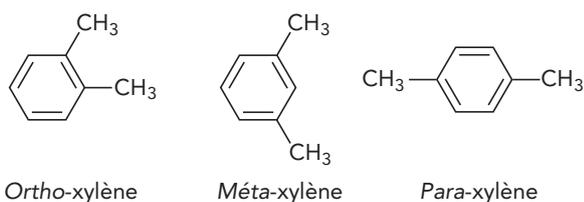
2. a. Formules topologiques des alcanes isomères de formule C_6H_{14} :



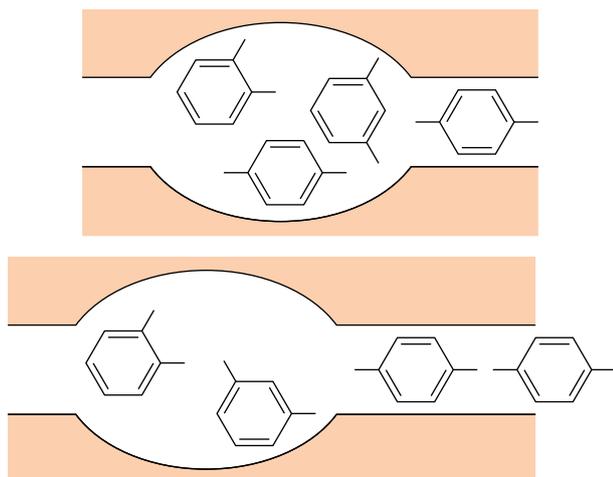
b. Les alcanes linéaires à longues chaînes peuvent pénétrer à l'intérieur des zéolithes (a) pour y être craqués en alcanes correspondant à des molécules plus petites. Les alcanes ramifiés ne peuvent pénétrer à l'intérieur des zéolithes et ne sont pas modifiés (b) :



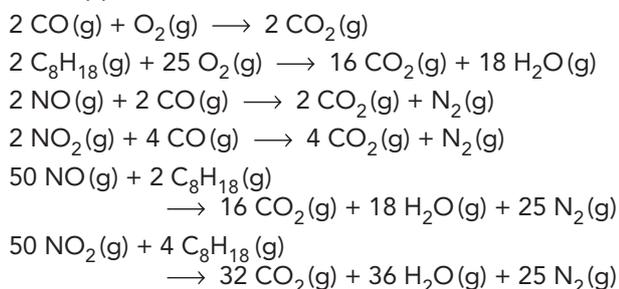
3.



Si la taille des canaux est bien choisie, seul l'isomère *para* peut sortir du catalyseur, les réactions de formation des xylènes étant des équilibres, ceux-ci sont déplacés pour favoriser la formation de l'isomère *para* :

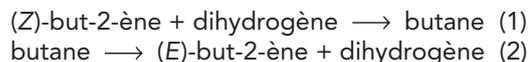


4. Équations permettant de dépolluer les gaz d'échappement :



5. Il est nécessaire d'utiliser un catalyseur très sélectif pour purifier, avec du dioxygène, un mélange contenant du monoxyde de carbone et du dihydrogène, car le mélange dihydrogène et dioxygène est explosif et la réaction d'équation $2 \text{H}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g}) \longrightarrow 2 \text{H}_2\text{O}(\text{g})$ doit être absolument évitée.

6. En présence de platine, on pourra avoir, entre autres, la suite de réactions suivantes :



7. Le paramètre physique déterminant pour l'efficacité d'un catalyseur en catalyse hétérogène est sa surface. Ainsi donne-t-on une surface de $100 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ pour l'alumine sur laquelle sont déposés les catalyseurs dans le pot catalytique et parle-t-on de zéolithe offrant une très grande surface de contact.

8. a. Il est nécessaire de recycler les catalyseurs, car ceux-ci sont généralement très coûteux et certains peuvent être très toxiques.

b. La séparation des produits de la réaction et du catalyseur est plus facile en catalyse hétérogène qu'en catalyse homogène, d'où une réduction des coûts de fabrication.

23 Fermentation malolactique du vin : suivi par dosage

$$1. \text{ a. } [\text{acide malique}](t) = \frac{n(\text{acide malique})(t)}{V}$$

$$= \frac{m(\text{ac.mal.})(t)}{V \cdot M(\text{ac.mal.})}$$

$$= \frac{C_m(t)}{M(\text{ac.mal.})}$$

$$\text{Or, } M(\text{ac.mal.}) = 4 \times M(\text{C}) + 5 \times M(\text{O}) + 6 \times M(\text{H})$$

$$= 134 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$\text{d'où : } [\text{acide malique}](t) = \frac{C_m(t)}{134}$$

$$\text{b. } n_{\text{ac.mal.}}(0) = 2,6 \times 10^{-2} \text{ mol}$$

2. a. Avec un tableau d'avancement, il vient :

$$n_{\text{ac.mal.}}(t) = n_{\text{ac.mal.}}(0) - x(t)$$

$$\text{soit : } x(t) = n_{\text{ac.mal.}}(0) - n_{\text{ac.mal.}}(t)$$

$$\text{c'est-à-dire : } x(t) = 2,6 \times 10^{-2} - n_{\text{ac.mal.}}(t)$$

b. Voir le tableau d'avancement, en fin de chapitre.

$$3. \text{ b. } x_{1/2} = 1,3 \times 10^{-2} \text{ mol, d'où } t_{1/2} \approx 7 \text{ jours.}$$

24 Chimie et spéléologie : suivi volumétrique

$$1. n(\text{CaCO}_3) = 20 \text{ mmol ; } n(\text{H}_3\text{O}^+) = 10 \text{ mmol.}$$

2. $x_{\text{max}} = 5,0 \text{ mmol}$; les ions H_3O^+ constituent le réactif limitant.

$$3. \text{ a. } x(t) = \frac{P_{\text{atm.}} \cdot V(\text{CO}_2)}{R \cdot T}$$

t (s)	0	20	40	60	80	100
V_{CO_2} (mL)	0	29	49	63	72	79
x(t) (mmol)	0	1,2	2,0	2,6	3,0	3,3

t (s)	120	140	160	180	200	220
V_{CO_2} (mL)	84	89	93	97	100	103
x(t) (mmol)	3,5	3,7	3,8	4,0	4,1	4,2

t (s)	240	260	280	300	320	340
V_{CO_2} (mL)	106	109	111	113	115	117
x(t) (mmol)	4,4	4,5	4,6	4,7	4,7	4,8

t (s)	360	380	400	420	440
V_{CO_2} (mL)	118	119	121	121	121
x(t) (mmol)	4,9	4,9	5,0	5,0	5,0

b. Il est alors possible de tracer le graphe $x(t) = f(t)$.

$$\text{c. } V(\text{CO}_2)_{\text{max}} = x_{\text{max}} \cdot \frac{R \cdot T}{P_{\text{atm.}}} = 121 \text{ mL, d'où } t_f = 400 \text{ s.}$$

d. Pour $x_{1/2} = \frac{x_{\max}}{2} = 2,5 \text{ mmol}$, $t = t_{1/2} = 55 \text{ s}$.

4. a. Si la température diminue, le système évolue moins rapidement et $t_{1/2}$ augmente.

b. Le graphe $x(t) = f(t)$ pour une température inférieure à 25 °C se situe en dessous du graphe tracé en 3b.

25 Suivi par spectrophotométrie

1. a. La solution étudiée suit la loi de Beer-Lambert, car l'absorbance A est proportionnelle à la concentration C de l'espèce colorée.

b. $k = \frac{A}{C} = 320 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$

c. À l'instant t : $[I_2(t)] = \frac{A(t)}{k}$
Or: $[I_2(t)] = \frac{n(I_2)(t)}{V_{\text{tot}}} = \frac{n(I_2)(t)}{V_1 + V_2}$

d'où: $n(I_2)(t) = A(t) \cdot \frac{V_1 + V_2}{k}$

d.

t (min)	1	2	4	6	8	10
A(t)	0,08	0,13	0,23	0,31	0,39	0,45
n(I ₂)(t) (μmol)	5	8	14	19	24	28

t (min)	12	14	16	18	20	30
A(t)	0,50	0,55	0,59	0,62	0,65	0,74
n(I ₂)(t) (μmol)	31	34	37	39	41	46

t (min)	40	50	60	90
A(t)	0,77	0,79	0,80	0,80
n(I ₂)(t) (μmol)	48	49	50	50

2. a. Si x est l'avancement de la réaction d'équation:



alors: $n(I_2)(t) = x$

b. Le tracé de la courbe $x = f(t)$ est immédiat à l'aide des données du tableau.

c. Le temps de demi-réaction $t_{1/2}$ est le temps au bout duquel la moitié du réactif limitant est consommé. C'est aussi le temps au bout duquel:

$$n(I_2)(t_{1/2}) = x_{1/2} = \frac{n(I_2)(t_f)}{2} = \frac{x_f}{2} = 25 \text{ μmol.}$$

Sur le graphe, on lit: $t_{1/2} \approx 25 \text{ min}$ et $t_f \approx 60 \text{ min}$, soit:
 $t_f \approx 2,4 t_{1/2}$

26 Saponification d'un ester: suivi conductimétrique

1. Le tableau d'avancement s'écrit:

Temps	Avancement	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2 + \text{HO}^{-}(\text{aq}) \longrightarrow \text{CH}_3 - \text{CO}_2^{-}(\text{aq}) + \text{C}_2\text{H}_5 - \text{OH}(\text{aq})$			
0	0	$C_0 \cdot V$	$C_0 \cdot V$	0	0
t	$x(t)$	$C_0 \cdot V - x(t)$	$C_0 \cdot V - x(t)$	$x(t)$	$x(t)$
t_{∞}	x_{∞}	$C_0 \cdot V - x_{\infty}$	$C_0 \cdot V - x_{\infty}$	x_{∞}	x_{∞}

2. a. Les espèces chimiques responsables du caractère conducteur de la solution sont les ions sodium $\text{Na}^{+}(\text{aq})$, hydroxyde $\text{HO}^{-}(\text{aq})$ et éthanoate $\text{CH}_3 - \text{CO}_2^{-}(\text{aq})$.

b. Au cours de la réaction, la concentration des ions $\text{Na}^{+}(\text{aq})$ reste constante; en revanche, celle des ions $\text{HO}^{-}(\text{aq})$ diminue et celle des ions $\text{CH}_3 - \text{CO}_2^{-}(\text{aq})$ augmente. Comme tout ion $\text{HO}^{-}(\text{aq})$ qui disparaît

est remplacé par un ion $\text{CH}_3 - \text{CO}_2^{-}(\text{aq})$ et que $\lambda_{\text{HO}^{-}} > \lambda_{\text{CH}_3 - \text{CO}_2^{-}}$ la conductivité de la solution diminue.

3. a. $\sigma_t = C_0 \cdot \lambda_{\text{Na}^{+}} + \left[\frac{C_0 \cdot V - x(t)}{V} \right] \cdot \lambda_{\text{HO}^{-}} + \left[\frac{x(t)}{V} \right] \cdot \lambda_{\text{CH}_3 - \text{CO}_2^{-}}$ (1)

b. À $t = 0$: $x(t) = 0$

d'où: $\sigma_0 = (\lambda_{\text{Na}^{+}} + \lambda_{\text{HO}^{-}}) \cdot C_0$

alors qu'à t_{∞} : $x(t) = x_{\infty} = C_0 \cdot V$

et $\sigma_{\infty} = (\lambda_{\text{Na}^{+}} + \lambda_{\text{CH}_3 - \text{CO}_2^{-}}) \cdot C_0$

c. (1) peut s'écrire:

$$\sigma_t = C_0 \cdot (\lambda_{\text{Na}^{+}} + \lambda_{\text{HO}^{-}}) + \left[\frac{x(t)}{V} \right] \cdot (\lambda_{\text{CH}_3 - \text{CO}_2^{-}} - \lambda_{\text{HO}^{-}})$$

soit: $\sigma_t = C_0 \cdot (\lambda_{\text{Na}^{+}} + \lambda_{\text{HO}^{-}})$

$$+ \left[\frac{x(t)}{V} \right] \cdot (\lambda_{\text{CH}_3 - \text{CO}_2^{-}} - \lambda_{\text{HO}^{-}} + \lambda_{\text{Na}^{+}} - \lambda_{\text{Na}^{+}})$$

d'où: $\sigma_t = C_0 \cdot (\lambda_{\text{Na}^{+}} + \lambda_{\text{HO}^{-}})$

$$+ \left[\frac{x(t)}{V} \right] \cdot [(\lambda_{\text{CH}_3 - \text{CO}_2^{-}} + \lambda_{\text{Na}^{+}}) - (\lambda_{\text{Na}^{+}} + \lambda_{\text{HO}^{-}})]$$

alors: $\sigma_t = \sigma_0 + \left[\frac{x(t)}{V} \right] \cdot \frac{[\sigma_{\infty} - \sigma_0]}{C_0}$

et $\sigma_t = \sigma_0 + x(t) \cdot \frac{[\sigma_{\infty} - \sigma_0]}{(C_0 \cdot V)}$

soit enfin: $x(t) = C_0 \cdot \frac{V(\sigma_0 - \sigma_t)}{(\sigma_0 - \sigma_{\infty})}$

4. La relation trouvée permet de calculer les valeurs de l'avancement $x(t)$ à chaque instant:

t (min)	0	5	9	13	20	27	t_{∞}
σ (Sm ⁻¹)	0,250	0,210	0,192	0,178	0,160	0,148	0,091
x(t) (mmol)	0	0,252	0,365	0,453	0,566	0,642	1,00

Le tracé de la courbe $x = f(t)$ est immédiat à l'aide des données du tableau.

a. Avancement maximal: $x_{\max} = x_{\infty} = 1,00 \text{ mmol}$.

b. Le temps de demi-réaction $t_{1/2}$ est le temps au bout duquel la moitié du réactif limitant est consommé. C'est aussi le temps au bout duquel:

$$x(t) = x_{1/2} = 0,5 = \frac{x_{\infty}}{2} = 0,500 \text{ mmol.}$$

Sur le graphe, on lit $t_{1/2} = 16 \text{ min}$.

27 Étude d'un durcisseur de colle à bois

1. Le temps de demi-réaction $t_{1/2}$ est le temps au bout duquel la moitié du réactif limitant est consommé. C'est aussi le temps au bout duquel:

$$[\text{H}^{+}(t)] = [\text{H}^{+}(t_{1/2})]_1 = \frac{[\text{H}^{+}]_{\max}}{2} = 0,5 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

Sur le graphe, on lit $t_{1/2} = 1,8 \text{ min}$.

2. Lorsque la température croît, l'évolution du système est plus rapide, c'est donc la courbe G_3 qui correspond à une température supérieure à $\theta_1 = 20 \text{ °C}$.

3. a. Lorsque t devient très grand et tend vers l'infini, $\exp(-t/\tau)$ tend vers zéro, alors $[\text{H}^{+}(\text{aq})]$ tend vers sa valeur maximale. La constante A correspond donc à $[\text{H}^{+}(\text{aq})]_{\max}$.

b. τ est homogène à un temps, il doit ici être exprimé en minute.

Lorsque $t = t_{1/2}$, $[\text{H}^{+}(\text{aq})]_{1/2} = 0,5 A$, alors que lorsque $t = \tau$, $[\text{H}^{+}(\text{aq})] = A(1 - \exp(-1)) = 0,63 A$;

τ est donc plus grand que $t_{1/2}$.

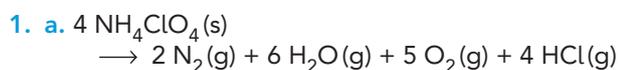
c. $A = [\text{H}^{+}(\text{aq})]_{\max} = 1,0 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

τ est la valeur de t pour laquelle $[\text{H}^{+}(\text{aq})] = 0,63 A$; sur le graphe, on lit $\tau = 2,6 \text{ min}$.

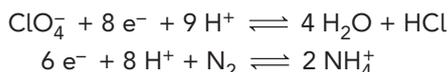
d. A est indépendant de la température contrairement à τ qui diminue lorsque la température croît.

Retour sur l'ouverture du chapitre

28 Des réactions d'oxydoréduction plus ou moins vives...



b. On vérifie qu'il est possible d'écrire des demi-équations électroniques faisant intervenir les ions ClO_4^- et NH_4^+ :

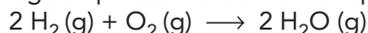


2. Dans l'étage principal cryotechnique (EPC):

$$n(\text{H}_2) = \frac{m(\text{H}_2)}{M(\text{H}_2)} = 1,3 \times 10^7 \text{ mol};$$

$$n(\text{O}_2) = \frac{m(\text{O}_2)}{M(\text{O}_2)} = 4,14 \times 10^6 \text{ mol}.$$

Dans cet étage se produit la réaction d'équation:



On constate que $n(\text{H}_2) > 2 n(\text{O}_2)$, le dihydrogène est en excès.

3. Masse de perchlorate d'ammonium réagissant par unité de temps:

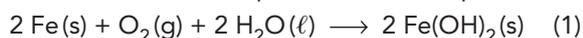
$$m(\text{NH}_4\text{ClO}_4) = \frac{0,68 \times 474}{130} = 2,48 \text{ tonnes par seconde}.$$

Masse de dioxygène réagissant par unité de temps:

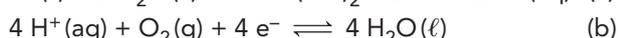
$$m(\text{O}_2) = \frac{132,5}{570} = 0,232 \text{ tonne par seconde}.$$

Ces deux réactions sont très rapides.

4. Les équations des étapes (1) et (2) sont des combinaisons de deux demi-équations électroniques:

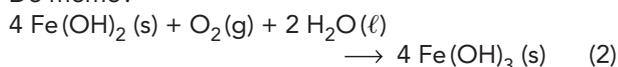


résultant de la combinaison de:

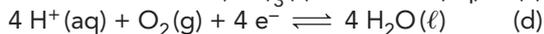
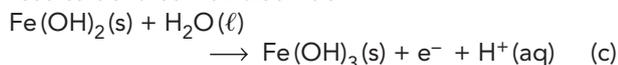


Ainsi: $(1) = 2 \times (\text{a}) + (\text{b})$

De même:



résulte de la combinaison de:



Ainsi: $(2) = 4 \times (\text{c}) + (\text{d})$

5. a. Le temps en abscisse est en année, ce qui est l'indication d'une réaction lente, voire très lente.

b. Les paramètres favorisant la formation de la rouille mis en évidence dans ces graphes sont:

- la présence d'eau ;
- la présence d'espèces ioniques (atmosphère marine, atmosphère polluée).

c. Une tôle en acier d'épaisseur $e = 25 \mu\text{m}$, soit $0,025 \text{ mm}$, est entièrement rouillée:

- en 1,5 mois en atmosphère humide et polluée ;
- en 2,1 ans en atmosphère pure et humide.

Ces résultats mettent en évidence le rôle de la pollution de l'atmosphère, source d'espèces ioniques.

6. Il est nécessaire de connaître la masse volumique ρ_{Fe} du fer pour passer de la perte de masse par unité de surface à la perte d'épaisseur.

$$m = V \cdot \rho_{\text{Fe}} = S \cdot e \cdot \rho_{\text{Fe}} \quad \text{d'où } \rho_{\text{Fe}} = \frac{m/S}{e}$$

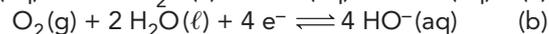
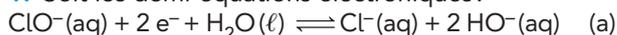
En utilisant le couple de valeurs $(m/S) = 14 \text{ g/dm}^2$ et $e = 0,18 \text{ mm} = 1,8 \times 10^{-3} \text{ dm}$, on obtient:

$$\rho_{\text{Fe}} = \frac{14}{1,8 \times 10^{-3}} = 7,8 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}.$$

Comprendre un énoncé

29 Décomposition d'une eau de Javel

1. Soit les demi-équations électroniques:



On vérifie que: $(1) = (\text{a}) - \frac{(\text{b})}{2}$

2. $n(\text{O}_2)_\infty = 13,2 \text{ mmol}$;

$n(\text{ClO}^-)_0 = 2 n(\text{O}_2)_\infty = 26,3 \text{ mmol}$, d'où:

$$[\text{ClO}^-]_0 = 263 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

3. a. À l'instant t , $n(\text{ClO}^-)(t) = n(\text{ClO}^-)_0 - 2 n(\text{O}_2)(t)$, avec $n(\text{O}_2)(t) = V(\text{O}_2) / V_m$

$$\text{d'où: } [\text{ClO}^-] = [\text{ClO}^-]_0 - \frac{2 (V(\text{O}_2) / V_m)}{V}$$

b. À l'instant $t = 180 \text{ s}$:

$$[\text{ClO}^-] = 263 - 2 \times \frac{189}{0,100} = 94 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

4. a. Le tracé de la courbe $x = f(t)$ est immédiat à l'aide des données du tableau.

b. Le temps de demi-réaction $t_{1/2}$ est le temps au bout duquel la moitié du réactif limitant, ici, $\text{ClO}^-(\text{aq})$, est consommé. Sur le graphe, on lit $t_{1/2} = 129 \text{ s}$.

5. En l'absence de catalyseur, la réaction est beaucoup moins rapide; aussi, la courbe représentant l'évolution de $[\text{ClO}^-] = f(t)$ en l'absence d'ions cobalt se situera au-dessus de celle obtenue en présence de catalyseur.

Exercice 23, question 2.

t(jours)	0	4	8	12	16	20	28
$C_m(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	3,5	2,3	1,6	0,8	0,5	0,27	0
[acide malique](t) ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	$2,6 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$	$6,0 \times 10^{-3}$	$3,7 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-3}$	0
x(t)(mol)	0	$9,0 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$2,2 \times 10^{-2}$	$2,4 \times 10^{-2}$	$2,6 \times 10^{-2}$

Bibliographie et sitographie

- A. DURUPHTY (dir.), *Chimie PCSI*, Hachette, collection HPrépa, 2003.
- P. GRÉCIAS, *Chimie PCSI*, Tec et Doc, 2008.
- H. R. HORTON (dir.), *Principes de Biochimie*, De Boeck, 1994.
- J.-C. CHOTARD (dir.), *Chimie fondamentale: Réactions organiques et enzymatiques*, Hermann, 1982.
- Site Wikipédia : Catalyse.

Activités

1 La chiralité (p. 256)

A Une histoire de symétrie

2 A et A' sont superposables; ce n'est pas le cas de B et B'.

3 A possède un plan de symétrie, mais B n'en possède pas.

4 Un objet chiral ne doit pas posséder de plan de symétrie.

B Un peu d'histoire

5 Objets chiraux : gant, clef, ciseaux, tire-bouchon, vis, coquille d'escargot, ampoule à vis.

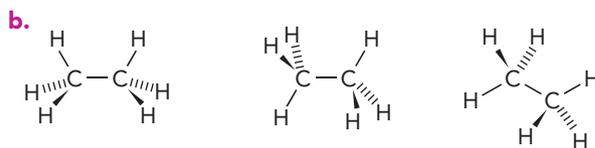
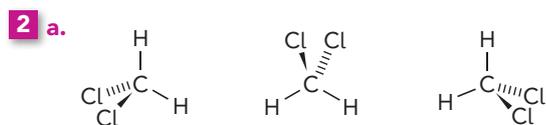
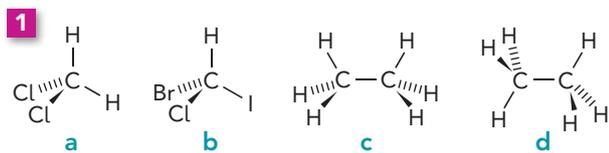
6 Quelques exemples de chiralité :

- en art : des colonnes torsadées;
- en architecture : un escalier en colimaçon;
- dans la flore : le lierre grimpant;
- dans la faune : une coquille d'escargot.

7 L'homochiralité caractérise le fait de n'exister que sous une seule des deux formes.

8 PASTEUR, en travaillant sur la fermentation du vin, découvrit la chiralité. En effet, en observant à la loupe des cristaux d'acide tartrique, il s'aperçut qu'il existait deux types de cristaux, images l'un de l'autre dans un miroir. Il les sépara et les analysa. Il en conclut que la dissymétrie au niveau macroscopique existait aussi au niveau moléculaire.

2 Représentation de Cram (p. 257)



3 Les molécules chirales (p. 257)

1 Les molécules B et D sont chirales.

2 Images dans le miroir :

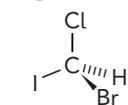


Image de B

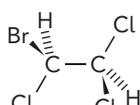


Image de D

3 Toutes les molécules chirales possèdent un carbone tétraédrique relié à quatre atomes différents.

4 Relations de stéréoisomérisation entre molécules (p. 258)

Lot	Énantiomères	Diastéréoisomères	Molécules identiques
Lot 1	(A; C); (B; C)		(A; B)
Lot 2	(B'; C')	(A'; B'); (A'; C')	
Lot 3		(A''; C''); (B''; C'')	(A''; B'')

2 Les molécules du lot 1 contiennent un atome de carbone asymétrique. Les molécules du lot 2 contiennent deux atomes de carbone asymétrique.

5 Comparaison des propriétés physiques de diastéréoisomères (p. 258)

1 Lorsque, de part et d'autre de la double liaison d'un composé de formule $AHC=CHB$, les groupes d'atomes A et B ne sont pas des atomes d'hydrogène H, il existe deux stéréoisomères de configuration appelés Z et E :

- dans le stéréoisomère Z, les deux atomes d'hydrogène se trouvent du même côté de la double liaison;
- dans le stéréoisomère E, ils se trouvent de part et d'autre de la double liaison.

Liaison hydrogène : liaison de type électrostatique entre un atome d'hydrogène relié à un atome très électronégatif (F, O et N) et un atome très électronégatif possédant un doublet non liant (F, O et N).

2 Pour passer de l'acide fumarique à l'acide maléique, il faut casser des liaisons, donc ce sont des stéréoisomères de configuration. Elles ne sont pas images l'une de l'autre dans un miroir plan, donc ce sont des diastéréoisomères.

3 Matériel et produits à utiliser :

- des tubes à essais et leur support;
- de l'acide fumarique;
- de l'acide maléique;
- une spatule;
- une coupelle de pesée;
- une balance;
- de l'eau distillée;
- un banc Kofler.

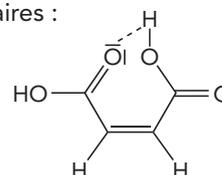
Comparaison des solubilités :

Pour chacun des solides :

- en peser une masse $m = 1,0 \text{ g}$;
 - l'introduire dans 10 mL d'eau distillée contenue dans un tube à essai;
 - observer et conclure (à $25 \text{ }^\circ\text{C}$: $6,3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ pour l'acide fumarique et $780 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ pour l'acide maléique).
- Pour les températures de fusion, il faut utiliser un

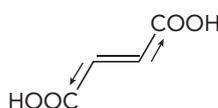
banc Kofler : l'acide fumarique se sublime à $200 \text{ }^\circ\text{C}$, alors que l'acide maléique fond à $131 \text{ }^\circ\text{C}$.

4 Le stéréoisomère E ne donne que des liaisons hydrogène intermoléculaires, alors que le stéréoisomère Z peut donner des liaisons hydrogène inter- et intramoléculaires :

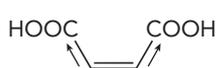


Dans le stéréoisomère E, le $\text{H}^{\delta+}$ et les O sont trop éloignés pour créer des liaisons H intramoléculaires.

5 Le stéréoisomère E est apolaire, alors que le stéréoisomère Z est polaire :



Les deux moments dipolaires sont dirigés en sens inverse; la molécule d'acide fumarique est donc apolaire.



Les deux moments dipolaires sont dirigés dans le même sens; la molécule d'acide maléique est donc polaire.

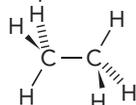
6 L'acide fumarique ne donne que des liaisons hydrogène intermoléculaires, ce qui explique que sa température de fusion soit nettement supérieure à celle de l'acide maléique.

L'acide maléique est nettement plus soluble dans l'eau que l'acide fumarique. La principale raison est que l'acide maléique est beaucoup plus polaire que l'acide fumarique.

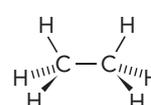
7 Deux diastéréoisomères ont des propriétés physiques différentes (exemples : solubilités dans l'eau, polarités, températures de fusion).

6 Conformations de l'éthane et du butane (p. 259)

1 • Conformation la plus stable de l'éthane :



• Conformation la moins stable de l'éthane :

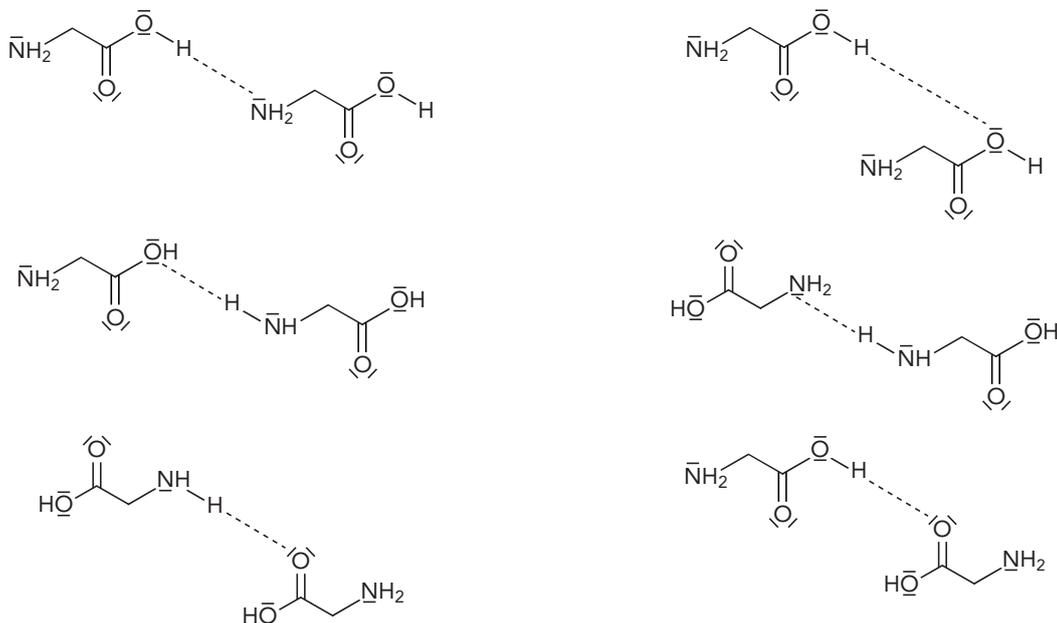


2 Il faut repérer les conformations où la répulsion des nuages électroniques est minimale (répulsion des électrons de liaison et répulsion des électrons des groupements méthyle) : $A < B, C < D, E < F$.

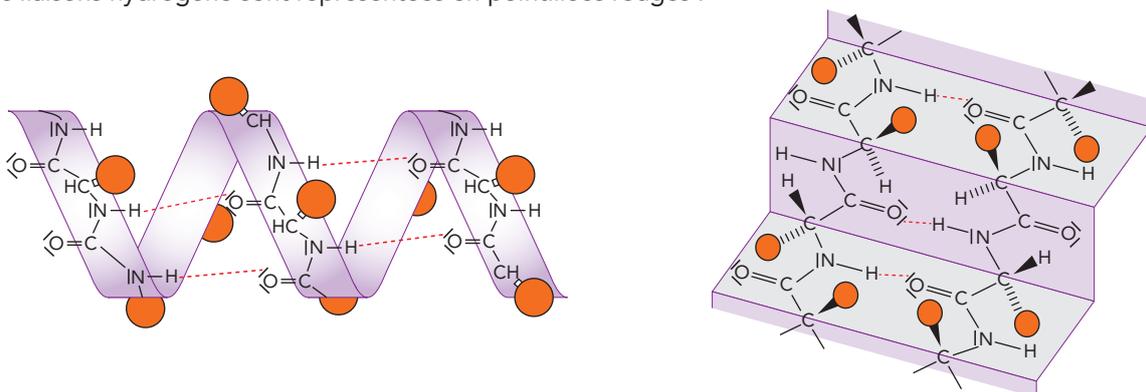
7 Propriétés biologiques et stéréochimie (p. 259-260)

A Conformations de molécules biologiques

1 Liaisons hydrogène susceptibles de s'établir entre deux molécules :



2 Les liaisons hydrogène sont représentées en pointillées rouges :

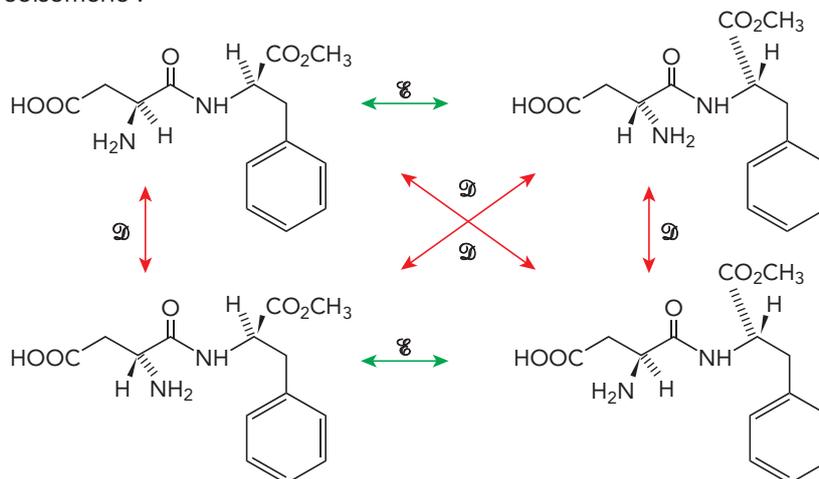


B Propriétés biologiques des stéréoisomères

3 a. Couples d'énantiomères : (A et C), puis (B et D). Tout autre couple est un couple de diastéréoisomères.

b. La signification de ppb est partie par milliard.

4 Relations de stéréoisomérisie :



5 Les enzymes et protéines contenues dans le corps humain sont des molécules chirales. Or, les deux énantiomères du principe actif d'un médicament n'ont pas les mêmes propriétés biochimiques. Il faut souvent commercialiser un médicament sous forme énantiomère pur. Ce n'est pas nécessaire si l'un des deux énantiomères est inactif ou si les deux énantiomères ont le même effet sur le corps humain.

6 La température de coagulation du blanc d'œuf est nettement inférieure à la température à laquelle l'aspartame s'isomérise. Cela n'est pas surprenant, car les liaisons hydrogène cassées lors de la coagulation du blanc d'œuf sont beaucoup plus faibles que les liaisons covalentes cassées lors de l'isomérisation de l'aspartame.

Exercices (p. 267-277)

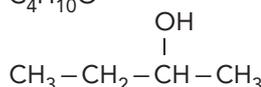
QCM

1 1. B; 2. C; **2** 1. A, B et C; 2. B; **3** 1. B; 2. B; 3. B; 4. A; 5. A; 6. B et C.

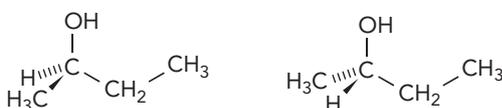
Application immédiate

4 Identifier une molécule chirale et la représenter dans l'espace

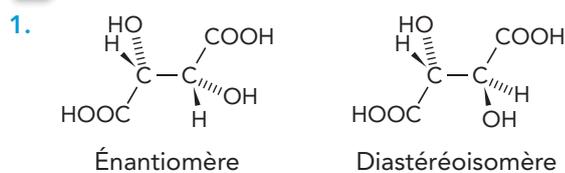
1. Butan-2-ol : $C_4H_{10}O$



2. Cette molécule est chirale, car elle possède un atome de carbone asymétrique.



5 Reconnaître une relation d'isomérisie



2. Deux énantiomères ont mêmes propriétés physiques et chimiques, mais des propriétés biochimiques différentes.

Pour commencer

6 Maîtriser le concept de chiralité

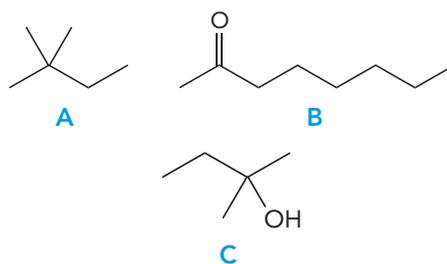
1. La chiralité est la propriété d'un objet de ne pas être superposable à son image dans un miroir plan.
2. Sont chiraux la chaussure, l'hélice de bateau et le tire-bouchon. Les autres sont achiraux.

7 Reconnaître une molécule chirale

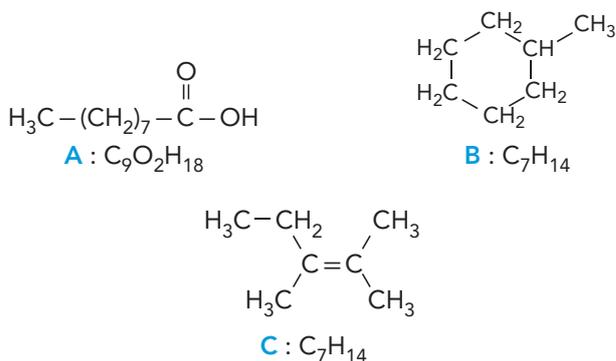
Les molécules **A** et **D** sont chirales, car elles ne sont pas superposables à leur image dans un miroir plan.

8 Utiliser la représentation topologique

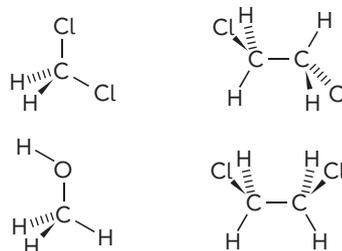
1. Représentations topologiques :



2. Formules brutes et semi-développées :

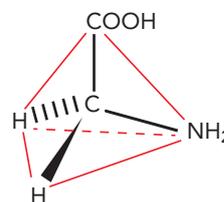


9 Utiliser la représentation de Cram



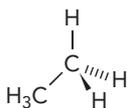
10 Établir une représentation de Cram

1. et 2.

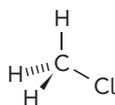


11 Identifier des représentations de Cram incorrectes

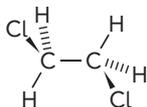
A : La liaison qui pointe vers l'arrière du plan doit être dirigée vers le bas.



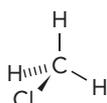
B : Les liaisons qui pointent vers l'avant et vers l'arrière doivent être du même côté du plan perpendiculaire à la feuille.



C : Deux liaisons sont inversées sur le premier carbone pour respecter la perspective.

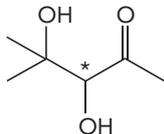
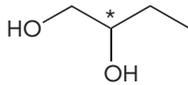
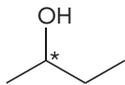


D : L'angle de 109° n'est pas respecté entre les deux liaisons dans le plan de la feuille.



E : La représentation est correcte.

12 Identifier les atomes de carbone asymétriques

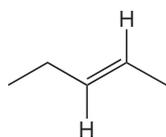


13 Reconnaître si des molécules sont identiques, énantiomères ou diastéréoisomères

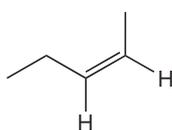
1. A₂.
2. B₂.
3. C et C₃ sont identiques, car on passe de l'une à l'autre par simple rotation autour de la liaison C-C. C et C₂ sont des énantiomères, alors que C et C₁ sont des diastéréoisomères.

14 Reconnaître une stéréoisomérisation Z/E

1. Seule la molécule **B** présente l'isomérisation Z/E. En effet, l'atome de carbone terminal de la molécule **A** est lié à deux atomes d'hydrogène et celui de **C** à deux groupes -CH₃. Diastéréoisomères de **B** :



Isomère E

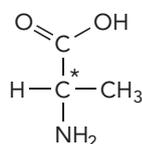


Isomère Z

2. **A** ne présente pas l'isomérisation Z/E, **B** est l'isomère E et **C** est l'isomère Z.

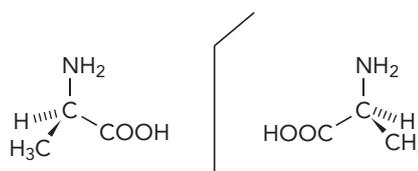
15 Représenter un couple d'énantiomères

1. La molécule d'alanine possède un atome de carbone asymétrique :



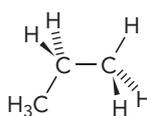
2. La molécule d'alanine qui possède un seul atome de carbone asymétrique est chirale.

3. Il existe deux stéréoisomères de configuration pour la molécule d'alanine :

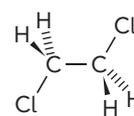


16 Trouver la conformation la plus stable et la moins stable

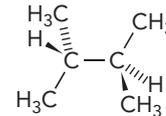
Les conformations décalées dans lesquelles les groupements encombrants sont les plus éloignés sont les plus stables :



A

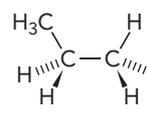


B

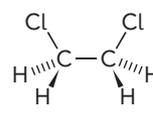


C

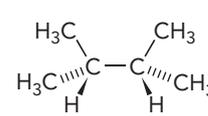
Les conformations éclipsées dans lesquelles les groupements encombrants sont les uns en face des autres sont les moins stables :



A



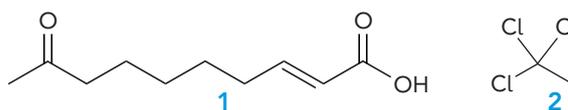
B



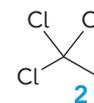
C

Pour s'entraîner

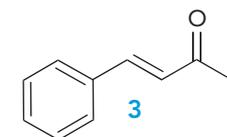
17 De la formule semi-développée à la formule topologique



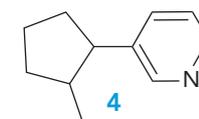
1



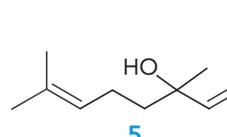
2



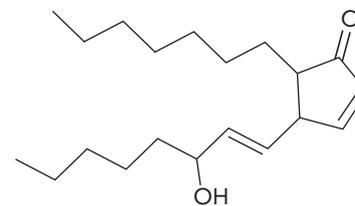
3



4



5



6

18 Reconnaître une molécule chirale

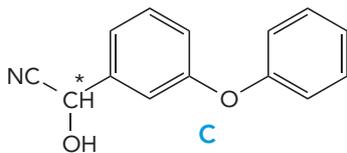
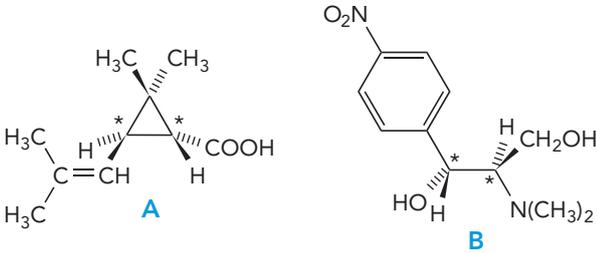
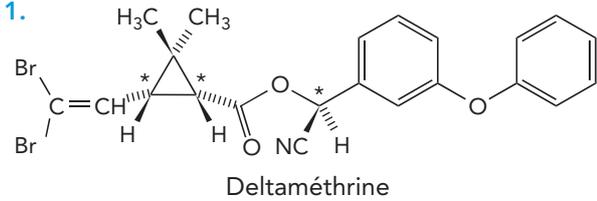
Les molécules **B** et **D** sont chirales, car elles possèdent un seul atome de carbone asymétrique.

La molécule **A** est superposable à son image dans un miroir plan, donc elle est achirale.

La molécule **C** possède deux atomes de carbone asymétrique, mais il existe un plan de symétrie, donc la molécule est achirale.

19 Un insecticide chiral

1.

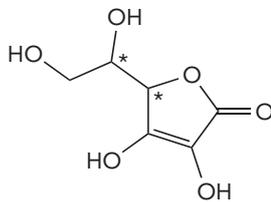


2. La deltaméthrine ne présente pas l'isomérisation Z/E, car il y a deux atomes de brome sur le carbone de la double liaison.

20 La vitamine C

1. Il s'agit d'une représentation topologique. La formule brute de la vitamine C est $C_6O_6H_8$.

2. a. et b. La molécule de vitamine C comporte deux atomes de carbone asymétriques :



3. La molécule d'acide ascorbique existe sous quatre formes stéréoisomères de configuration.

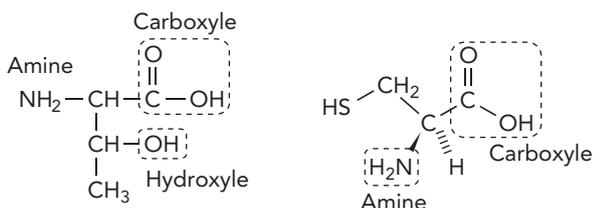
4. La molécule de vitamine C est chirale. En effet, aucun de ses stéréoisomères n'est superposable à son image.

21 Relations de stéréoisomérisation

A : énantiomères. B : molécules identiques.
C : diastéréoisomères. D : molécules identiques.
E : diastéréoisomères.

22 Autour des acides α -aminés

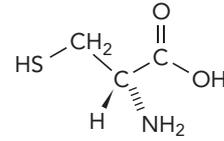
1. Groupes caractéristiques :



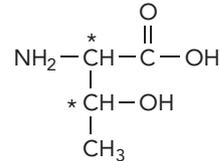
Un acide α -aminé possède à la fois un groupe amine et un groupe carboxyle.

Ces deux groupes sont liés à un même atome de carbone.

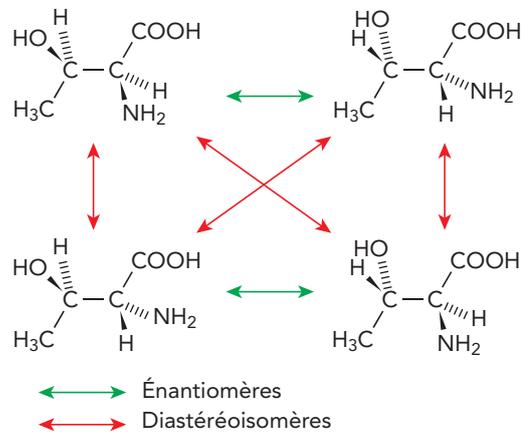
2. La molécule de cystéine est chirale, car elle possède un seul atome de carbone asymétrique. Son énantiomère est représenté ci-dessous :



3. a. La molécule de thréonine possède deux atomes de carbone asymétriques :



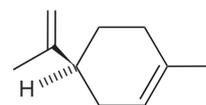
b. Il existe quatre stéréoisomères de configuration représentés ci-dessous :



23 Les théories de l'odeur

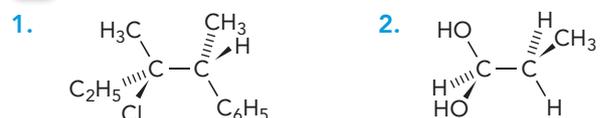
1. Les molécules d'acétate d'isoamyle et d'acide heptanoïque ont même formule brute ($C_7O_2H_{14}$), mais des formules semi-développées différentes. Ce sont des isomères de constitution.

2. Deux stéréoisomères ont même formule semi-développée, mais des représentations spatiales différentes. La molécule ci-dessous est un stéréoisomère (de configuration) du limonène :



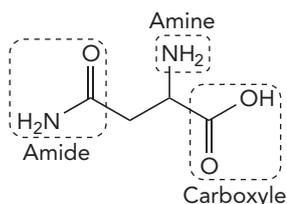
3. Deux énantiomères ont, en général, des propriétés chimiques identiques, mais généralement des propriétés biochimiques différentes. La perception des odeurs fait appel à des réactions biochimiques, ce qui explique que des odeurs d'énantiomères peuvent être perçues différentes.

24 Former des couples

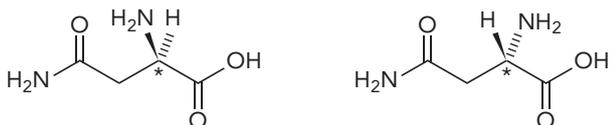


25 Lasparagine

1. Les groupes caractéristiques présents dans la molécule de l'asparagine sont amide, amine et carboxyle.



2. La molécule d'asparagine possède un atome de carbone asymétrique. Elle existe donc sous la forme de configurations différentes :



3. Un mélange racémique est un mélange équimolaire des deux énantiomères. Deux énantiomères ayant mêmes propriétés chimiques, si aucune précaution n'est prise, on aboutit à un mélange racémique.

4. Deux énantiomères ont, en général, des propriétés biochimiques différentes. Par exemple, la dopa est soit toxique vis-à-vis de l'organisme, soit un médicament anti-Parkinson selon sa configuration. La commercialisation d'un médicament sous forme racémique pourrait être possible si les deux énantiomères avaient des propriétés biochimiques similaires ou si l'un des deux était inactif. Cependant, on commercialise de moins en moins un médicament sous forme racémique pour éviter le cas où l'un des deux énantiomères serait toxique (dopa) ou aurait un effet antagoniste à l'autre.

Pour aller plus loin

26 Stereochemistry and drug

Traduction du texte :

« Vous pouvez trouver étrange qu'il ait fallu vendre le naproxène sous forme d'un seul énantiomère, alors que nous avons dit que les énantiomères ont des propriétés chimiques identiques.

Les deux énantiomères ont effectivement des propriétés identiques au laboratoire, mais, lorsqu'ils se trouvent dans un système vivant, ils se différencient, comme les autres molécules chirales, par les interactions avec les molécules énantiomériquement pures qu'ils rencontrent.

On peut faire une analogie avec une paire de gants : les gants ont le même poids, sont fait du même matériau et ont la même couleur ; sous ces aspects, ils sont identiques. Mais mettez-les en interaction avec un environnement chiral, une main par exemple, et ils se différencient, parce qu'un seul s'adapte.

La façon dont les médicaments entrent en interaction avec leurs récepteurs ressemble beaucoup à ce système {main + gant}. Les récepteurs des médicaments, auxquels les molécules des médicaments

s'adaptent comme des mains dans les gants, sont presque toujours des molécules de protéines qui sont énantiomériquement pures parce qu'elles ne sont constituées que de L-aminoacides.

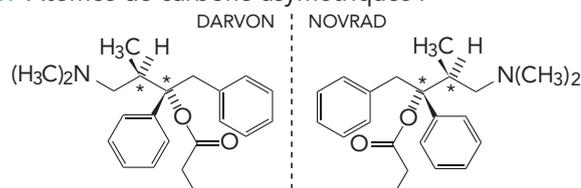
L'interaction de l'un des énantiomères du médicament a des chances d'être meilleure que celle de l'autre, ou même tout à fait différente, si bien que les deux énantiomères des médicaments chiraux ont souvent des effets pharmacologiques très différents. Dans le cas du naproxène, l'énantiomère (S) est 28 fois plus efficace que le (R). En revanche, l'ibuprofène est toujours vendu sous forme racémique parce que les deux énantiomères ont plus ou moins le même effet analgésique.

Parfois les énantiomères d'un médicament ont des propriétés thérapeutiques complètement différentes. Le Darvon, un analgésique, en est un exemple. Son énantiomère, appelé Novrad, est un antitussif. Remarquez que la relation énantiomérique entre ces deux médicaments s'étend au-delà de leur structure chimique ! »

1. Un acide aminé possède une fonction acide carboxylique et une fonction amine. La lettre « L » désigne une des deux configurations de l'acide aminé (correspondant souvent à la configuration (S) de la question 4). Tous les acides aminés naturels ont une configuration L.

2. Deux énantiomères ont mêmes propriétés chimiques, mais n'ont généralement pas les mêmes propriétés biochimiques (car les enzymes, protéines contenues dans le corps humain, sont des molécules chirales), d'où la nécessité de souvent commercialiser un médicament sous forme énantiomère pur. Ce n'est pas nécessaire si un des deux énantiomères est inactif ou si les deux énantiomères ont le même effet sur le corps humain.

3. Atomes de carbone asymétriques :

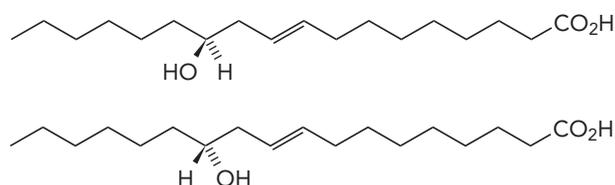


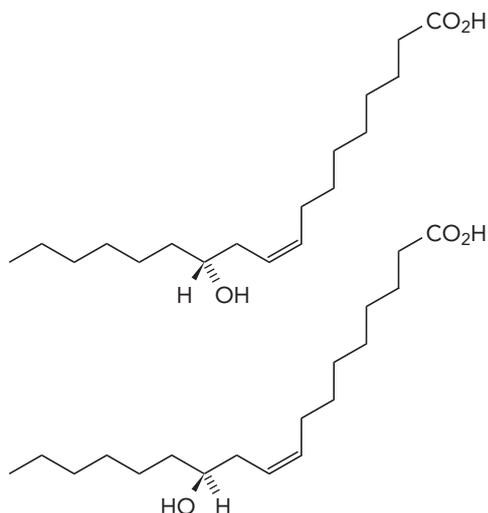
4. Une molécule possédant un atome de carbone asymétrique possède deux configurations différentes. On peut supposer, par analogie avec l'isomérisation Z et E, qu'on les nomme (R) et (S).

5. Les molécules sont des images spéculaires, mais pas seulement : leurs noms aussi sont images l'un de l'autre dans un miroir plan.

27 À chacun son rythme

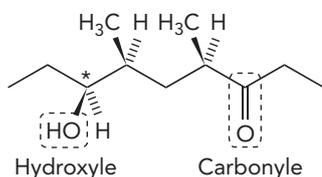
La molécule d'acide ricinoléique possède un atome de carbone asymétrique et une double liaison possédant l'isomérisation Z/E. Il existe donc quatre stéréoisomères de configurations différentes, tous diastéréoisomères entre eux :





28 Phéromone sexuelle de coléoptère

1. La formule brute de la molécule est $C_{11}H_{22}O_2$.
Son nom est la 7-hydroxy-4,6-diméthylnon-3-one.



2. Elle possède un atome de carbone asymétrique (voir molécule ci-dessus). Elle présente donc deux stéréoisomères de configuration.

3. Cette molécule ne possède plus d'atome de carbone asymétrique. Elle n'est donc pas chirale.

29 Stéréochimie de quelques molécules

Partie A : Molécules chirales

1. Chiralité :

- Les molécules **A** et **E** ne sont pas chirales, car elles ne possèdent pas d'atome de carbone asymétrique.
- La molécule **B** est chirale, car elle possède un seul atome de carbone asymétrique.
- La molécule **C** est chirale, car elle possède deux atomes de carbone asymétriques et aucun plan ou centre de symétrie.
- Les molécules **D** et **F** sont achirales, bien que possédant deux atomes de carbone asymétriques, car elles possèdent un plan de symétrie.

2. La molécule **B** existe sous deux configurations différentes.

La molécule **C** possède trois autres stéréoisomères de configuration.

La molécule **D** possède deux autres stéréoisomères de configuration (existence d'un composé méso, voir exercice 30).

Complément

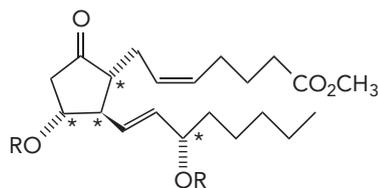
E et **F** existent sous deux autres formes.

E est le stéréoisomère trans (les atomes d'hydrogène sont de part et d'autre du plan moyen du cycle) ; on peut donc envisager le stéréoisomère cis.

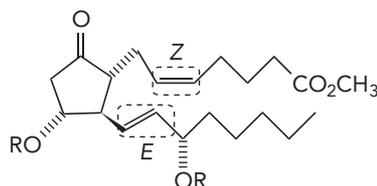
F est le stéréoisomère cis (les atomes d'hydrogène du même côté du plan moyen du cycle) ; on peut donc envisager le stéréoisomère trans.

Partie B : Stéréochimie d'une prostaglandine

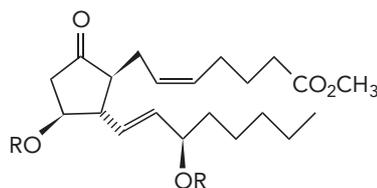
1. a. Atomes de carbone asymétriques de **G** :



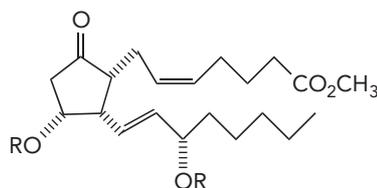
b. Configuration Z ou E des doubles liaisons :



c. Énantiomère de **G** :



Un diastéréoisomère de **G** :



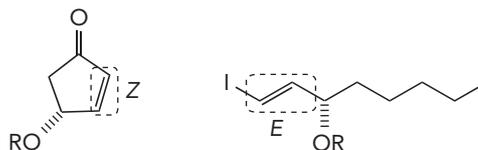
d. La molécule possède quatre atomes de carbone asymétriques et deux doubles liaisons possédant l'isomérisme Z/E, ce qui fait $2^6 = 64$ stéréoisomères au total pour cette molécule.

2. a. Formule brute de **H** : $C_{10}H_{15}O_2$

Formule brute de **I** : $C_{13}H_{25}OI$

b. Les molécules **B** et **C** sont chirales, car elles possèdent un seul atome de carbone asymétrique.

c. Configuration Z ou E des doubles liaisons :



Retour sur l'ouverture du chapitre

30 Les stéréoisomères de l'acide tartrique

1. **Molécule chirale** : molécule non superposable à son image dans un miroir plan.

Mélange racémique : mélange équimolaire de deux énantiomères.

Dédoubler : séparer et isoler les deux énantiomères.

Image spéculaire : image dans un miroir plan.

Énantiomères : stéréoisomères de configuration images l'un de l'autre dans un miroir plan.

2. La molécule dite méso est achirale, donc superposable à son image dans un miroir plan. Il s'agit de la molécule **B**.

A et **C** sont donc des énantiomères.

3. La molécule dite méso est achirale, car elle possède un plan de symétrie.

4. Généralement, une molécule comportant deux atomes de carbone asymétrique correspond à quatre stéréoisomères de configuration. Si on dessine les quatre stéréoisomères, on s'aperçoit que deux molécules sont identiques (molécule méso), donc il n'en reste plus que trois.

5. Deux diastéréoisomères ont des propriétés physiques (T_{fus} , ρ) différentes, alors que deux énantiomères ont des propriétés physiques identiques. γ correspond à la molécule **B**. α et β correspondent à **A** et **C**, on ne peut pas en dire plus.

Complément

La seule propriété physique qui permet de différencier deux énantiomères est la mesure du pouvoir rotatoire (pouvoirs rotatoires spécifiques opposés).

Mais, même s'ils étaient fournis, on n'aurait pas pu identifier **A** et **C**, car il n'y a aucun lien entre la configuration des atomes de carbone asymétrique et le signe du pouvoir rotatoire.

Comprendre un énoncé

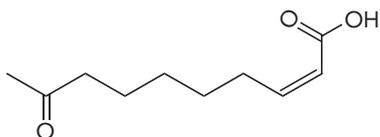
31 Les messagers chimiques chez les abeilles

1. a. Formule brute de **A** : $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}_3$

b. La molécule **A** possède une configuration *E*.

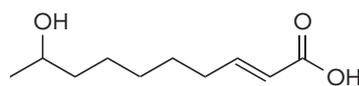
c. Deux diastéréoisomères ont des propriétés chimiques (et donc biochimiques) différentes.

Le stéréoisomère *Z* ne véhicule donc pas, *a priori*, le même signal messenger chez les abeilles.

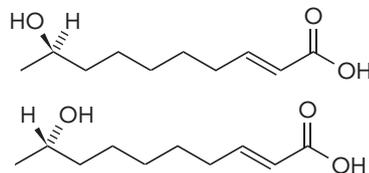


2. a. La molécule **B** est chirale, car elle possède un seul atome de carbone asymétrique (molécule ci-dessous).

b. Stéréoisomère *E* :



c. Les molécules ci-dessous sont des diastéréoisomères :



Bibliographie

- G. GROS et G. BONNI, « Le monde de la chiralité », *Actualité chimique*, mars 1995.
- V. PELLEGRIN, « Les représentations graphiques bidimensionnelles des molécules en chimie organique avec un crayon et un papier », *BUP* n° 811, février 1999.
- A. RABIER, « Quelques expériences illustrant la notion d'isométrie *Z-E* », *BUP* n° 777, octobre 1995.
- A. COLLET, « Chiralité, vivant et médicaments », *Revue du palais de la Découverte*, avril 1996.
- A. BRACK, « L'asymétrie du vivant », *Pour la Science*, hors-série, juillet 1998.
- J. DROUIN, *Introduction à la chimie organique*, Librairie du Cèdre, 2005.
- A. COLLET, *Molécules chirales*, EDP sciences, 2006.
- P. C. VOLLHARDT et N. E. SCHORE, *Traité de chimie organique*, De Boeck, 2004.
- J. CLAYDEN (dir.), *Chimie organique*, De Boeck, 2002.

Transformations en chimie organique : aspect macroscopique

Chapitre

11

Activités

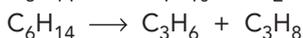
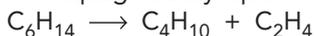
1 Modification de la structure chimique (p. 280-281)

A Modification de chaîne

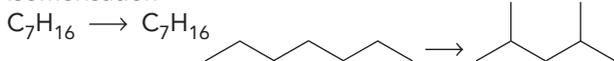
1 Un catalyseur accélère une réaction chimique sans être consommé par cette réaction.

2 Toutes les situations proposées correspondent à des modifications de chaîne carbonée avec apparition de double liaison C=C dans certains cas.

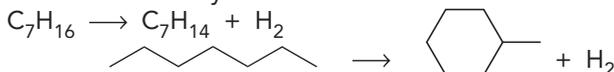
– Craquage catalytique : raccourcissement



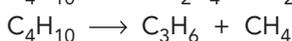
– Reformage :
isomérisation



ou formation de cycle



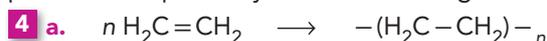
– Vapocraquage : raccourcissement et création de double liaison C=C



3 Le craquage catalytique consiste à casser, en présence de catalyseurs, la chaîne carbonée de molécules pour obtenir des molécules de chaîne carbonée plus courte, dont certaines possèdent une double liaison C=C. Il permet d'obtenir des hydrocarbures de chaîne plus courte, dont certains possèdent des doubles liaisons C=C et dont la structure pourra ensuite être modifiée pour répondre aux besoins en carburants ou aux besoins de l'industrie chimique.

Le vapocraquage est un craquage réalisé en présence de vapeur d'eau. Il permet d'obtenir des alcènes, matières premières importantes de l'industrie chimique.

Le reformage permet d'obtenir des espèces de chaîne carbonée ramifiée ou des composés aromatiques comme le toluène C_7H_8 . Ce sont des carburants plus performants que les hydrocarbures d'origine.



Le terme de polyéthylène est utilisé car la structure du produit obtenu est constitué d'un très grand nombre de morceaux (ou motifs) $-H_2C-CH_2-$ de même formule brute que l'éthène (ou éthylène).

b. Un allongement de la chaîne carbonée est ainsi réalisé.

B Modification de groupe caractéristique

5 Les groupes caractéristiques présents dans l'acide salicylique sont les groupes hydroxyle et carboxyle. Les groupes caractéristiques présents dans l'acide acétylsalicylique sont les groupes carboxyle et ester.

6 Les médicaments contenant comme seul principe actif l'acide acétylsalicylique sont vendus sous le nom d'aspirine.

C Étude expérimentale

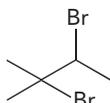
7 a. Formules topologiques :

2-méthylbut-2-ène

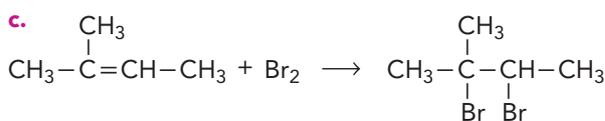


Produit obtenu :

2,3-dibromo-2-méthylbutane



b. Un changement de groupe caractéristique a été mis en jeu.



8 La réaction mise en jeu est une réaction d'addition de la molécule de dibrome sur les atomes de carbone doublement liés de l'alcène.

9 L'addition de quelques gouttes d'alcène dans une solution aqueuse de dibrome orangée conduit, lors

de l'agitation du mélange réactionnel, à une décoloration rapide de la solution aqueuse, ce qui traduit la consommation du dibrome qui réagit avec l'alcène à température ordinaire.

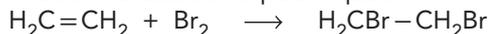
10 La solution aqueuse de dibrome se décolore en présence du composé gazeux formé lors de la réaction dans le tube T₂, ce qui traduit la présence d'une double liaison C=C.

Or, le réactif vaseline, ne décolorant pas la solution aqueuse de dibrome (test réalisé dans le tube T₁), ne contient pas de double liaison C=C. Une réaction s'est donc produite dans T₁ et a conduit à la formation d'un produit contenant une double liaison C=C.

11 a. La réaction qui se produit dans le tube T₂ est une réaction de craquage catalytique. En effet, une des réactions qui a eu lieu correspond à un raccourcissement de la chaîne carbonée et la réaction se fait en présence de paille de fer qui la catalyse.

b. La réaction qui se produit dans le tube T₃ est la réaction d'addition de dibrome sur la double liaison C=C d'un alcène tel que l'éthène formé dans l'équation proposée.

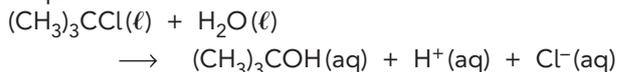
Cette réaction d'addition a pour équation :



12 Dans le tube T₃, lors de l'addition de la solution de nitrate d'argent, il se forme un précipité blanc noircissant à la lumière : c'est un précipité de chlorure d'argent AgCl, qui traduit la présence d'ions chlorure dans la solution aqueuse contenue dans le tube T₁.

Le papier pH montre que cette solution aqueuse est plus acide que l'eau déminéralisée utilisée au départ : des ions H⁺(aq) se sont donc formés.

13 Une réaction a donc eu lieu dans le tube T₁ entre l'eau et le 2-chloro-2-méthylpropane et a formé des ions chlorure Cl⁻(aq) et hydrogène H⁺(aq) selon l'équation :



14 Lors de cette réaction, il se produit une modification de groupe caractéristique.

15 La réaction mise en jeu est une réaction de *substitution* de l'atome de chlore par un groupe hydroxyle.

2 Reconnaissance de groupes caractéristiques (p. 282)

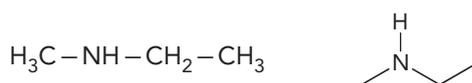
1 a. Acide 2-méthylpropanoïque : groupe carboxyle et fonction acide carboxylique.



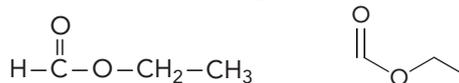
b. Éthanal : groupe carbonyle et fonction aldéhyde.



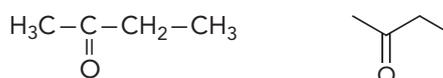
c. N-méthyléthylamine : groupe et fonction amine.



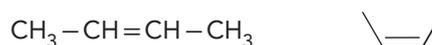
d. Méthanoate d'éthyle : groupe et fonction ester.



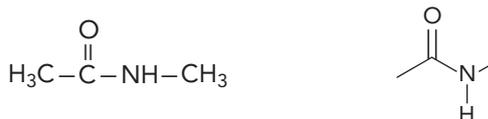
e. Butanone : groupe carbonyle et fonction cétone.



f. (Z)-but-2-ène : groupe C=C et fonction alcène.



g. N-méthyléthylamide : groupe et fonction amide.



2

Groupe caractéristique	Alcène	Carbonyle aldéhyde	Carbonyle cétone	Carboxyle	Ester	Amine	Amide
Formule	$\begin{array}{c} \diagdown \quad \diagup \\ \text{C}=\text{C} \\ \diagup \quad \diagdown \end{array}$	$\begin{array}{c} -\text{C}=\text{O} \\ \\ \text{H} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{C}-\text{C}=\text{O} \\ \\ \text{C} \end{array}$	$\begin{array}{c} -\text{C}=\text{O} \\ \\ \text{OH} \end{array}$	$\begin{array}{c} -\text{C}=\text{O} \\ \\ \text{O}-\text{C} \\ \text{ester} \end{array}$	$\begin{array}{c} -\text{N}- \\ \\ \text{amine} \end{array}$	$\begin{array}{c} -\text{C}=\text{O} \\ \\ -\text{N}- \\ \text{amide} \end{array}$
Terminaison du nom	-ène	-al	-one	Acide -oïque	-oate de -yle	-amine	-amide

3 Utilisation du nom systématique (p. 282)

1 a. La partie centrale du nom indique le nombre d'atomes de carbone de la chaîne principale; les ramifications de la chaîne carbonée sont indiquées par les préfixes alkyle; le numéro précédant chacun de ses groupes alkyle indique le numéro de l'atome de carbone auquel chacun de ces groupes alkyle est lié dans la chaîne principale.

La numérotation de la chaîne carbonée principale est telle que le numéro de l'atome de carbone du groupe fonctionnel correspondant à la terminaison du nom soit le plus petit possible.

b. Dans le 3-méthylbutane-1,2-diol, la présence de deux groupes hydroxyle portés par les atomes de carbone tétraédriques 1 et 2 de la chaîne carbonée (comportant quatre atomes de carbone) est indiquée par la terminaison -1,2-diol.

Dans le 2-méthylpentanal, la présence d'une fonction aldéhyde à une des extrémités de la chaîne carbonée principale est indiquée par la terminaison al.

Dans le 2-méthylpent-4-ène, la présence d'une fonction aldéhyde à une des extrémités de la chaîne carbonée principale est indiquée par la terminaison al, la présence d'une double liaison C=C liant les atomes de carbone n° 4 et 5 de la chaîne carbonée est indiquée par 4-èn.

Dans le 4-hydroxypentan-2-one, la présence d'une fonction cétone au niveau de l'atome de carbone n° 2 de la chaîne carbonée est indiquée par la terminaison -2-one. La présence d'un groupe hydroxyle sur l'atome de carbone n° 4 est indiquée par le préfixe 4-hydroxy.

Dans l'acide 3-méthylbutanoïque, la présence d'une fonction acide carboxylique à une des extrémités de la chaîne carbonée principale est indiquée par le préfixe acide et la terminaison oïque.

Dans l'acide 3-oxobutanoïque, la présence d'une fonction acide carboxylique à une des extrémités de la chaîne carbonée est indiquée par le préfixe acide et la terminaison oïque. La présence d'une fonction cétone sur l'atome de carbone n° 3 est indiquée par le préfixe 3-oxo.

Dans le 3-méthylbutanoate de méthyle, la présence d'une fonction ester est indiquée par la partie oate de.

2 a. Propanamide : fonction amide; chaîne carbonée à trois atomes de carbone.

b. Acide 3-hydroxypentanoïque : fonctions acide carboxylique et fonction alcool, portée par l'atome de carbone n° 3 de la chaîne carbonée qui comporte cinq atomes de carbone.

c. 2-méthylbutanamine : fonction amine NH₂ portée par le premier atome de carbone de la chaîne carbonée principale longue de quatre atomes de carbone, dont l'atome de carbone n° 2 porte un groupe méthyle.

d. 2-méthylbut-3-èn-1-ol : fonction alcool portée par l'atome de carbone tétraédrique n° 1 de la chaîne carbonée principale et fonction alcène, la double liaison C=C lie les atomes de carbone n° 3 et 4 de la chaîne carbonée principale.

3 La partie centrale du nom indique le nombre d'atomes de carbone de la chaîne principale; les ramifications de la chaîne carbonée sont indiquées par le préfixe alkyle, le numéro précédant chacun de ses groupes alkyle indique le numéro de l'atome de carbone auquel chacun de ces groupes alkyle est lié dans la chaîne principale.

Lorsque l'espèce considérée comporte un seul groupe caractéristique, la présence de celui-ci est indiquée par le suffixe, et la chaîne carbonée principale est numérotée de façon à ce que l'atome de carbone fonctionnel porte le numéro le plus petit possible.

Lorsque le composé comporte plus d'un groupe caractéristique, la terminaison de son nom renseigne sur un de ces groupes (qui fixe la numérotation de la chaîne carbonée principale); la présence d'une double liaison est indiquée juste avant la terminaison par la présence du radical èn précédé du numéro du premier atome de carbone trigonal (appartenant à la double liaison) rencontré dans la chaîne principale. La présence éventuelle d'autres groupes est indiquée par des préfixes spécifiques (oxo, hydroxy, etc.) précédés d'un numéro indiquant la position de l'atome de carbone auquel chacun de ces groupes caractéristiques est lié dans la chaîne principale.

4 Préparation d'un dérivé chloré (p. 283)

1 Bande d'absorption vers 3400 cm⁻¹ correspondant à la liaison O-H.

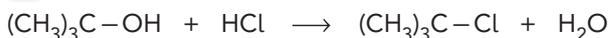
Bande d'absorption vers 3000 cm⁻¹ correspondant à la liaison C-H.

Bande d'absorption vers 1400 cm⁻¹ correspondant à la liaison C-O.

Les molécules de 2-méthylpropan-2-ol sont liées par

des liaisons hydrogène, car la bande d'absorption de la liaison O-H est large et située vers 3400 cm⁻¹.

2 Équation de la réaction :



La réaction correspond à un changement de groupe caractéristique.

Compléments

Manipulation

La température de fusion du 2-méthylpropan-2-ol est égale à 25 °C : il faut donc le faire fondre avant le TP en plongeant la bouteille (bouchon desserré) dans un récipient contenant de l'eau chaude.

Le liquide obtenu est versé juste avant usage dans un bécher et le volume attendu est mesuré à l'éprouvette graduée.

Les élèves doivent opérer rapidement pour éviter que l'alcool ne se solidifie.

Les élèves doivent utiliser l'erenmeyer dans lequel la réaction est réalisée pour récupérer les solutions aqueuses éliminées lors des décantations et garder les deux erlenmeyers secs pour récupérer le liquide organique pour le séchage et le liquide organique après séchage.

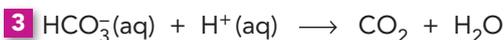
Matériel et produits

- Une éprouvette graduée de 50 mL ;
- un erlenmeyer de 250 mL ;
- un condenseur à air adapté à l'erenmeyer ;
- un agitateur magnétique et un barreau aimanté ;
- un support avec pince et noix ;
- une ampoule à décanter avec son bouchon ;
- deux erlenmeyers de 100 mL ;
- du papier-filtre et un entonnoir ;
- des gants et des lunettes de protection ;
- une spatule ;
- du papier ménage ;

- une solution concentrée d'acide chlorhydrique de concentration voisine de 11 mol · L⁻¹ (60 mL par binôme) ;
- une solution saturée d'hydrogénocarbonate de sodium (25 mL) ;
- une pissette d'eau distillée ;
- du sulfate de magnésium anhydre.

Sous la hotte

- Un Bécher de 100 mL ;
- une éprouvette graduée de 25 mL ;
- du 2-méthylpropan-2-ol.



4 Lors du séchage d'une phase organique, les molécules d'eau encore présentes sont éliminées par réaction avec un solide anhydre, tel que le sulfate de magnésium.

5 Un spectre infrarouge du produit permettrait de vérifier la disparition de la bande d'absorption de la liaison O–H et l'apparition de la bande d'absorption de la liaison C–Cl.

La mesure de l'indice de réfraction du liquide obtenu permettrait également d'identifier le produit.

6
$$n_0(\text{ol}) = \frac{d(\text{ol}) \cdot \mu(\text{eau}) \cdot V(\text{ol})}{M(\text{ol})} = \frac{0,781 \times 1,00 \times 15,0}{74}$$
$$= 0,158 \text{ mol}$$

$$n_0(\text{HCl}) = C \cdot V = 11 \times 30 \times 10^{-3} = 0,33 \text{ mol}$$

Le réactif limitant est donc l'alcool.

Le rendement de la synthèse est :

$$\rho = \frac{n(\text{RCl})_{\text{obtenu}}}{n(\text{RCl})_{\text{attendu}}} = \frac{n(\text{RCl})}{n_0(\text{ol})} = \frac{m(\text{RCl})}{M(\text{RCl}) \cdot n_0(\text{ol})}$$

7 La réaction de synthèse est une réaction de substitution du groupe hydroxyle de l'alcool par un atome de chlore.

5 Déshydratation d'un alcool (p. 284)

Compléments

Manipulation

L'erenmeyer devant recueillir l'hydrodistillat est placé dans un mélange eau-glace, car la température d'ébullition de l'alcène attendu est très faible. Pour la même raison, l'erenmeyer contenant l'alcène devra toujours être bouché et ne devra être tenu que par le col.

L'alcène, très volatil, a une odeur forte faisant penser à une fuite de gaz.

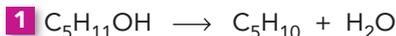
Lors de l'hydrodistillation, le volume d'eau obtenu est très faible ; il est possible de rajouter un peu d'eau distillée à la pissette pour mieux visualiser les phases dans l'ampoule à décanter.

Réserver deux des erlenmeyers secs pour la phase de séchage.

Matériel et produits

- Un ballon de 250 mL ;
- une tête de distillation ;
- un thermomètre ;
- un réfrigérant à eau avec tuyaux adaptés ;
- une allonge coudée ;
- deux supports avec pinces et noix ;
- un support élévateur ;
- un chauffe-ballon ;
- une éprouvette graduée de 25 mL ;
- une cuvette métallique ;
- trois erlenmeyers de 100 mL et un bouchon adapté ;
- une ampoule à décanter avec bouchon et support ;
- une spatule ;

- un entonnoir ;
- un rouleau de papier pH avec son échelle de teintes ;
- une baguette de verre ;
- une coupelle ;
- une pierre ponce ;
- du papier-filtre ;
- du papier ménage ;
- des glaçons (3) ;
- du 2-méthylbutan-2-ol (25 mL) ;
- de l'acide phosphorique concentrée (10 mL) ;
- une solution saturée d'hydrogénocarbonate de sodium ;
- du sulfate de magnésium anhydre.



2 L'acide phosphorique n'apparaît pas dans l'équation de la réaction : c'est un catalyseur.

3 La phase aqueuse, de densité supérieure à celle de l'alcène, constitue la phase inférieure dans l'ampoule à décanter.

4
$$n_0(\text{ol}) = \frac{d(\text{ol}) \cdot \mu(\text{eau}) \cdot V(\text{ol})}{M(\text{ol})} = \frac{0,806 \times 1,00 \times 25,0}{88,0}$$

$$= 0,229 \text{ mol.}$$

Le rendement de la synthèse est :

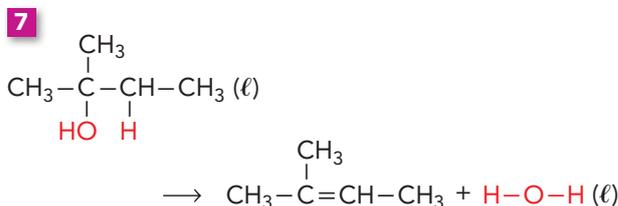
$$\rho = \frac{n(\text{ène})_{\text{obtenu}}}{n(\text{ène})_{\text{attendu}}} = \frac{n(\text{ène})}{n_0(\text{ol})} = \frac{m(\text{ène})}{M(\text{ène}) \cdot n_0(\text{ol})}$$

5 Bande d'absorption vers 3100 cm^{-1} correspondant à la liaison C-H.

Bande d'absorption vers 1680 cm^{-1} correspondant à la liaison C=C.

Absence de bande d'absorption de la liaison O-H vers 3400 cm^{-1} .

6 On peut tester la présence d'une double liaison C=C dans le produit obtenu en ajoutant deux gouttes du produit obtenu à 1 mL de solution aqueuse de dibrome contenu dans un tube à essais. Si la solution aqueuse de dibrome se décolore rapidement lors de l'agitation, c'est que le produit testé comporte une liaison multiple carbone-carbone dans sa structure.



Une molécule d'eau est éliminée lors de la réaction, d'où le nom de déshydratation qui lui est donné.

8 La réaction est une réaction d'élimination puisqu'une molécule d'eau est éliminée avec formation d'une double liaison C=C.

Bibliographie

Tout livre de chimie de l'enseignement supérieur :

- A. DURUPHY (dir.), *Chimie 1^{re} année PCSI*, Hachette, 2007;
- A. DURUPHY (dir.), *Chimie 2^e année PC PC**, Hachette;
- P. VOLLHARDT, *Chimie organique*, Éditions universitaires, 2004;
- J. DROUIN, *Introduction à la chimie organique*, Librairie du Cèdre, 2005.

Exercices

(p. 289-299)

QCM

- 1** 1. A et C; 2. C; 3. B; 4. A et C; 5. A et C; 6. C; 7. A, B et C; **2** 1. B et C; 2. C; 3. B; 4. B; 5. A.

Application immédiate

3 Identifier une espèce chimique organique à partir de son nom

1. Pour les trois : groupes amine et acide carboxylique et en plus groupe hydroxyle pour C.

2. Acide 2-aminoéthanoïque : B;
acide 2-amino-4-méthylpentanoïque : A;
acide 2-amino-3-hydroxypropanoïque : C.

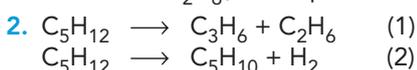
4 Déterminer la catégorie d'une réaction

(1) et (2) : addition; (3) : élimination.

Pour commencer

5 Étudier un craquage

1. B : éthane C_2H_6 ; A : pentane C_5H_{12} .



3. La chaîne carbonée est modifiée dans (1) et non modifiée dans (2).

6 Étudier un vapocraquage

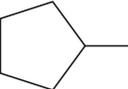
$C_4H_{10} \rightarrow C_4H_8 + H_2$: but-1-ène (ou but-2-ène) et dihydrogène.

$C_4H_{10} \rightarrow C_3H_6 + CH_4$: propène et méthane.

$C_4H_{10} \rightarrow 2 C_2H_4 + H_2$: éthène et dihydrogène.

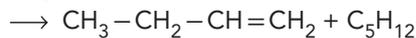
7 Étudier une modification de structure

$C_6H_{14} \rightarrow$  : modification de la chaîne carbonée sans modification du nombre d'atomes de carbone (isomérisation) : reformage.

$C_6H_{14} \rightarrow$  + H_2 : modification de la chaîne carbonée sans modification du nombre d'atomes de carbone (cyclisation) : reformage.

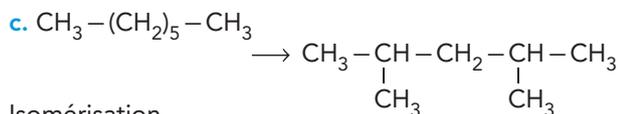
8 Modifier une chaîne carbonée

a. $CH_3 - (CH_2)_7 - CH_3$

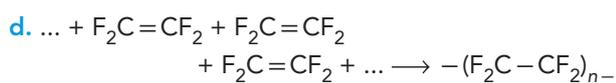


Raccourcissement de la chaîne carbonée.

b. $CH_3 - (CH_2)_5 - CH_3 \rightarrow C_6H_5 - CH_3 + 4 H_2$
Cyclisation.



Isomérisation.



Allongement de la chaîne carbonée.

9 Reconnaître des groupes caractéristiques

- Groupe amine : fonction amine ;
groupe carboxyle : fonction acide carboxylique.
- Groupe hydroxyle : fonction alcool ;
groupe amine : fonction amine.
- Groupe amine : fonction amine ;
groupe carboxyle : fonction acide carboxylique.
- Groupe hydroxyle : fonction phénol ;
groupe amide : fonction amide.
- Deux groupes ester : fonction ester ;
groupe hydroxyle : fonction alcool.

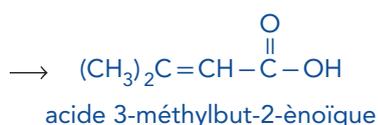
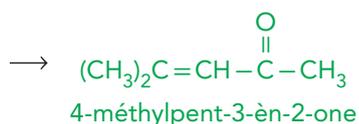
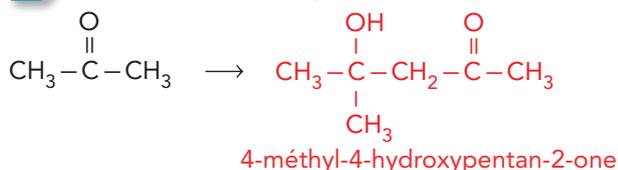
10 Utiliser le nom d'une espèce chimique

- Le groupe alcène et le groupe ester.
- La formule topologique est **A**.

11 Déterminer une structure chimique

- Les groupes caractéristiques présents sont le groupe alcène et le groupe amide.
- La formule topologique de cette espèce est la **A**.

12 Utiliser des noms systématiques



13 Distinguer une modification de chaîne d'une modification de groupe caractéristique

- et 2.

Équation (1) : modification de chaîne.

Équation (2) : modification de groupe caractéristique : passage du groupe hydroxyle au groupe carboxyle.

Équation (3) : modification de groupe caractéristique : passage du groupe alcène au groupe halogène.

14 Distinguer une modification de groupe caractéristique d'une modification de chaîne

- et 2.

Équation (1) : modification de chaîne.

Équation (2) : modification de groupe caractéristique : passage du groupe hydroxyle au groupe halogène.

Équation (3) : modification de groupe caractéristique : passage du groupe carboxyle au groupe amide.

15 Étudier des réactions

1. et 2. $\text{C}_2\text{H}_5-\text{OH} + \text{HCl} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5-\text{Cl} + \text{H}_2\text{O}$
réaction de substitution.

$\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2 + \text{HCl} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5-\text{Cl}$
réaction d'addition.

16 Étudier des réactifs et des produits d'une réaction

C'est une réaction d'élimination.

17 Rechercher la catégorie d'une réaction

1. $\text{CH}_4 + 2 \text{Cl}_2 \rightarrow \text{CH}_2\text{Cl}_2 + 2 \text{HCl}$

$\text{HCl} + \text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CH}_3\text{Cl} + \text{H}_2\text{O}$

$\text{CH}_3\text{Cl} + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{CH}_2\text{Cl}_2 + \text{HCl}$

2. Ce sont des réactions de substitution.

18 Analyser des réactifs et des produits

Équation (1) : réaction d'élimination.

Équation (2) : réaction d'addition.

Équation (3) : réaction d'élimination.

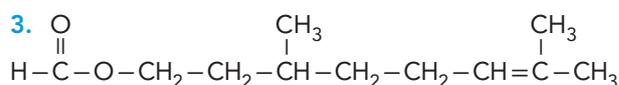
19 Déterminer la catégorie d'une réaction

La réaction (1) est une réaction d'addition ;
la réaction (2) est une réaction de substitution.

Pour s'entraîner

20 Parfums

- Groupe(s) caractéristique(s) : ester et alcène.
- $\text{R}-\text{COO}-\text{R}'$ avec $\text{R} : \text{H}$ et R' : chaîne carbonée principale à huit atomes de carbone avec une double liaison entre les atomes $n^{\text{os}} 6$ et 7 , un groupe méthyl sur l'atome de carbone $n^{\circ} 3$ et un sur l'atome de carbone $n^{\circ} 7$.



21 Polymères

- « Inertie chimique » signifie que le produit considéré ne réagit avec quasiment aucune espèce chimique.
- Formule du polymère : $-(\text{CF}_2-\text{CF}_2-)_n-$
La modification de chaîne qui a lieu lors de sa synthèse est un allongement de la chaîne carbonée.

22 À chacun son rythme

1. a. $\text{C}_4\text{H}_9-\text{OH} + \text{HI} \rightarrow \text{C}_4\text{H}_9-\text{I} + \text{H}_2\text{O}$

b. Réaction de substitution.

2. a. $n(\text{I}^-) = C \cdot V = 0,375 \text{ mol}$;

$n(\text{ol}) = \frac{m}{M} = 0,35 \text{ mol}$.

b. Réactif limitant : butan-2-ol.

$$c. n(P)_{\text{obt}} = \frac{m(P)}{M(P)} = 0,217 \text{ mol.}$$

$$\rho = \frac{n(P)_{\text{obt}}}{n(P)_{\text{att}}} = \frac{n(P)}{n(\text{ol})} = 0,62, \quad \text{soit } 62 \%$$

23 Des molécules biologiques

1. La glycolyse est un processus libérateur d'énergie au cours duquel le glucose est dégradé pour fournir de l'énergie.

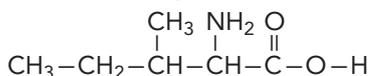
2. Les groupes caractéristiques de l'isoleucine sont le groupe carboxyle et le groupe amine.

Les groupes caractéristiques de l'acide lactique sont le groupe carboxyle et le groupe hydroxyle.

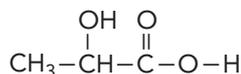
3. L'isoleucine, ou acide 2-amino-3-méthyl-pentanoïque, a une chaîne carbonée principale à **cinq atomes de carbone**.

L'acide lactique, ou acide 2-hydroxypropanoïque, a une chaîne carbonée à **trois atomes de carbone**.

4. Acide 2-amino-3-méthyl-pentanoïque :

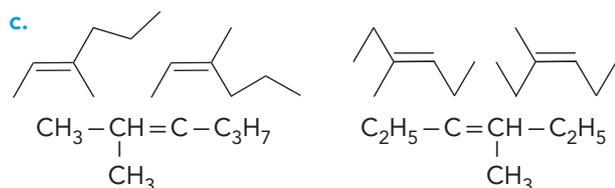
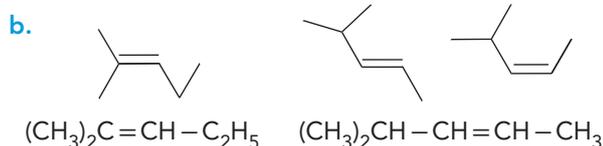
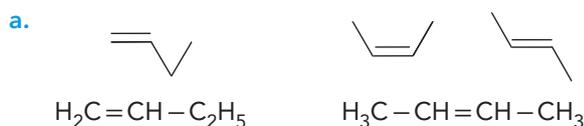


Acide lactique :

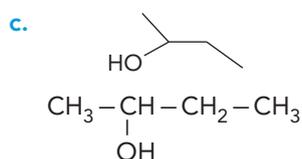
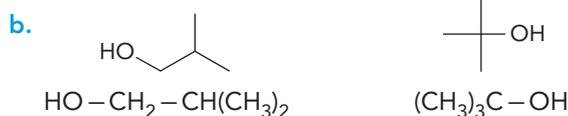
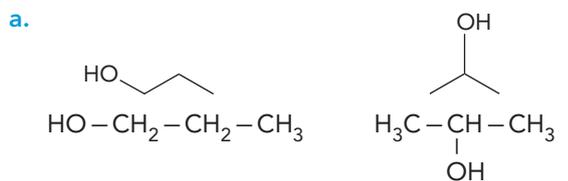


24 Déshydratation d'alcools

1. Formules semi-développées et topologiques :



2. Formules semi-développées et topologiques :



25 Hydrohalogénéation des alcènes

1. et 2. Les atomes de carbone asymétriques sont repérés par un astérisque*.

a. $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{Br}$

b. $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{Br}$ et $\text{CH}_3-\overset{*}{\underset{\text{Br}}{\text{C}}}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$

c. $\text{CH}_3-\overset{*}{\underset{\text{Br}}{\text{C}}}-\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{C}}-\text{CH}_3$ et $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\overset{*}{\underset{\text{Br}}{\text{C}}}-\underset{\text{CH}_3}{\text{C}}-\text{CH}_3$

26 Catégories de réactions

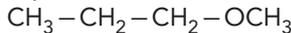
Équation (1) : réaction d'élimination A : H_2O

Équation (2) : réaction de substitution B : HI

Équation (3) : réaction d'élimination C : H_2

Équation (4) : réaction d'addition D : HI

Équation (5) : réaction de substitution E :



Équation (6) : réaction d'élimination F :



27 Petrochemistry

Traduction du texte :

« Lire cette introduction à la pétrochimie publiée sur le site de l'association des producteurs de produits pétrochimiques en Europe.

"Le travail de la raffinerie est de produire des modifications physiques et chimiques du pétrole brut et du gaz naturel, par un ensemble de procédés de fabrication très spécialisés.

Un de ces procédés est la distillation, c'est-à-dire l'extraction, à partir du pétrole brut lourd, de groupes d'hydrocarbures plus légers (appelés fractions). »

Deux de ces fractions sont familières aux consommateurs. L'une, le fuel, est utilisée pour le chauffage ou comme carburant diesel pour des applications automobiles. Une autre est le naphta, utilisé dans l'essence et aussi comme la principale source à partir de laquelle sont obtenus les produits pétrochimiques.

En ce qui concerne la pétrochimie, le travail de l'industrie pétrolière s'arrête au raffinage, et c'est là que le travail de l'industrie pétrochimique prend le relais.

La pétrochimie obtient sa matière première de la raffinerie : le naphta, les composants du gaz naturel tel que le butane, et une partie des sous-produits du raffinage du pétrole, tels que l'éthane et le propane. Ces matières premières sont ensuite traitées par une opération connue sous le nom de craquage.

Le craquage est tout simplement le processus de décomposition des molécules lourdes de pétrole en molécules plus légères, de plus grande valeur. Lors du vapocraquage, des températures élevées sont utilisées ; quand on utilise un catalyseur, on parle de craquage catalytique. [...] Une fois ces opérations terminées, de nouveaux produits sont obtenus, les blocs de construction de l'industrie pétrochimique : oléfines - c'est-à-dire principalement l'éthylène, le pro-

pylène et les composés appelés dérivés C4, incluant le butadiène – et aromatiques, que l'on appelle ainsi en raison de leur odeur particulière, c'est-à-dire principalement le benzène, le toluène et les xylènes." »

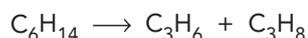
1. a. Lors d'une distillation, des espèces chimiques sont séparées selon leur température d'ébullition. La valeur des températures d'ébullition dépend des interactions existant entre les molécules de ces espèces. L'intensité des interactions de Van der Waals mises en jeu dépend de la structure et de la taille des molécules constituant le pétrole et donc de leur masse. C'est pour cela que le texte parle de fractions lourdes et de fractions légères.

Le raffinage met en jeu la séparation partielle des constituants du pétrole. L'industrie pétrochimique va modifier la structure des constituants des différentes fractions issues du raffinage.

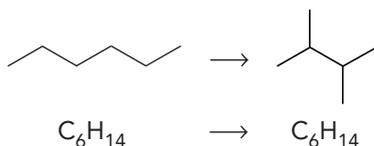
b. La distillation est une transformation physique.

c. Les opérations de la pétrochimie sont des transformations chimiques.

2. Lors du craquage catalytique ou du vapocraquage, la chaîne carbonée des molécules est raccourcie :



Lors du reformage, la structure de la chaîne carbonée est modifiée à nombre d'atomes de carbone constant :



3. Lors du craquage catalytique, un catalyseur est mis en jeu.

Lors du vapocraquage, de la vapeur d'eau est utilisée à haute température.

4. Les oléfines citées dans le texte ont pour formule topologique :

- éthène (ou éthylène)
- propène (ou propylène)
- but-1-ène
- (Z)-but-2-ène
- (E)-but-2-ène
- buta-1,3-diène

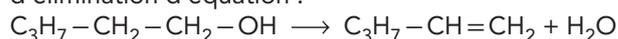
5. Le polyéthylène et le polypropylène sont deux produits synthétisés à partir des hydrocarbures issus de la pétrochimie.

28 Déshydratation

1. La large bande d'absorption de la liaison O–H présente dans le spectre **A**, entre 3 200 et 3 400 cm^{-1} , a disparu dans le spectre **B**.

Une fine bande d'absorption est apparue vers 1 650 cm^{-1} dans le spectre **B** : elle correspond à l'absorption de la double liaison C=C.

De plus, une bande d'absorption vers 3 100 cm^{-1} est apparue : elle correspond à l'absorption de la liaison $\text{C}_{\text{tri}}\text{--H}$ (C=C–H). La réaction est donc une réaction d'élimination d'équation :



2. L'alumine est un catalyseur.

3. Rendement de la synthèse :

$$n_0(\text{ol}) = \frac{m}{M(\text{ol})} = \frac{17,6}{5 \times 12,0 + 16,0 + 12 \times 1,0}$$

$$n_0(\text{ol}) = 0,200 \text{ mol};$$

$$n_f(\text{ène}) = \frac{V}{V_m} = \frac{3,2}{25,2} = 0,13 \text{ mol.}$$

Le rendement de cette synthèse est égal à :

$$\rho = \frac{n_f(\text{ène})}{n_0(\text{ol})} = \frac{0,13}{0,200} = 0,63, \text{ soit } 63 \text{ \%}.$$

Pour aller plus loin

29 Identification d'un alcène

1. Un alcène possédant n atomes de carbone a pour formule brute C_nH_{2n} .

Sa masse molaire est donc égale à

$$M = n \cdot M(\text{C}) + 2n \cdot M(\text{H}) = 14n.$$

Avec la valeur de M_A , il vient $n = 4$.

La formule brute de A s'écrit C_4H_8 .

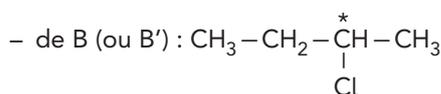
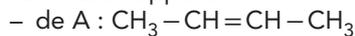
2. Les isomères de A sont :

- le but-1-ène
- le (Z)-but-2-ène
- le (E)-but-2-ène
- le méthylpropène



Une modification de groupe caractéristique se produit.

b. L'addition de chlorure d'hydrogène sur les différents isomères de A conduit uniquement à un mélange racémique, et donc à deux énantiomères, dans le seul cas des but-2-ène, d'où les formules semi-développées :

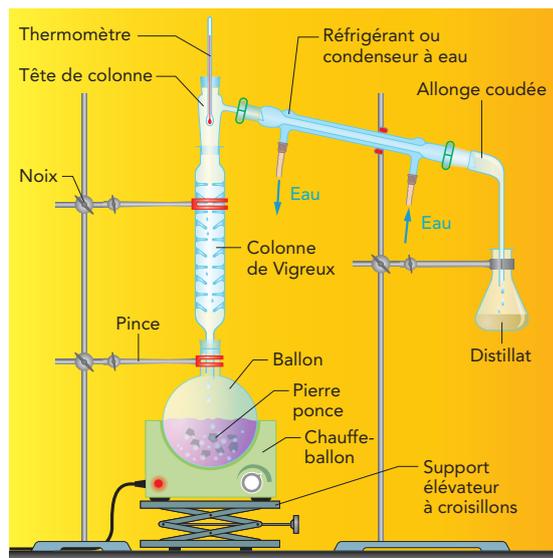


La structure de A n'est pas totalement déterminée, puisque le (Z)-but-2-ène et le (E)-but-2-ène conduisent tous deux au mélange de B et B'.

c. Comme B et B' comportent un atome de carbone asymétrique $\overset{*}{\text{C}}$, ils sont énantiomères, c'est-à-dire images l'un de l'autre dans un miroir plan et non superposables.

30 Identification

1. Schéma légendé du montage utilisé pour la distillation :



2. a. Équation de la réaction d'hydratation :

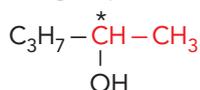


b. Lors de la réaction d'addition, le groupe hydroxyle peut se fixer sur l'atome de carbone 1, ou sur l'atome de carbone 2, du pent-1-ène. On peut donc obtenir le pentan-1-ol, $\text{C}_3\text{H}_7-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$, ou le pentan-2-ol, $\text{C}_3\text{H}_7-\overset{*}{\underset{\text{OH}}{\text{CH}}}-\text{CH}_3$

Seul le pentan-2-ol est chiral (il possède un atome de carbone asymétrique $\overset{*}{\text{C}}$).

c. L'acide sulfurique n'apparaît pas dans l'équation de l'hydratation du pent-1-ène : c'est un catalyseur de cette réaction.

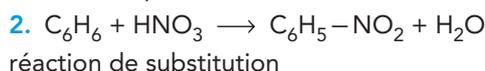
3. Dans le spectre RMN de l'alcool B, le doublet à 1,2 ppm correspondant à trois atomes d'hydrogène traduit la présence d'un groupe CH_3-CH . Ce groupe n'est présent que dans le pentan-2-ol,



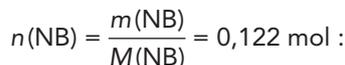
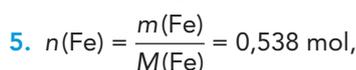
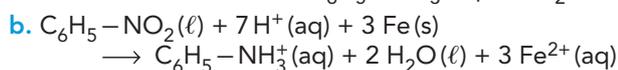
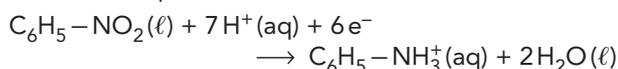
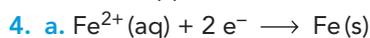
L'alcool B est donc le pentan-2-ol et l'alcool A le pentan-1-ol.

31 Préparation de l'aniline

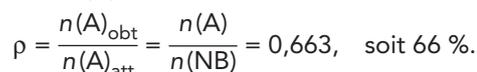
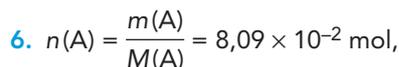
1. Travailler sous la hotte, porter des gants et des lunettes de protection.



3. L'aniline appartient à la famille des amines.



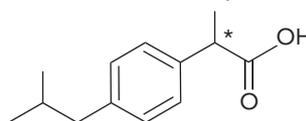
le nitrobenzène est le réactif limitant.



32 Synthèse de l'ibuprofène

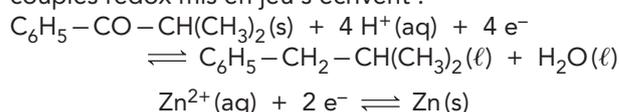
1. Un médicament antipyrétique permet de lutter contre la fièvre.

2. Formule de l'ibuprofène

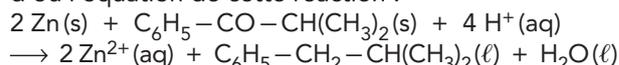


La molécule d'ibuprofène ne possède qu'un seul atome de carbone asymétrique : elle est donc chirale. La molécule présente deux stéréoisomères de configuration qui sont énantiomères.

3. Les demi-équations électroniques relatives aux couples redox mis en jeu s'écrivent :



d'où l'équation de cette réaction :



4. Étape (2) : groupe carbonyle pour le réactif organique et hydroxyle pour le produit.

Étape (3) : groupes hydroxyle et amide pour le réactif et groupe amide pour le produit organique.

Étape (4) : groupe amide pour le réactif organique et le produit.

Étape (5) : groupe amide pour le réactif organique et groupe carboxyle pour le produit organique.

5. a. et b. Étape (1) : réaction de substitution. Il se produit une modification de chaîne carbonée et de groupe caractéristique.

Étape (2) : réaction d'addition. Il se produit une modification de groupe caractéristique et de chaîne carbonée.

Étape (3) : réaction d'élimination. Il se produit une modification de groupe caractéristique.

Étape (4) : réaction d'addition. Il se produit une modification de groupe caractéristique.

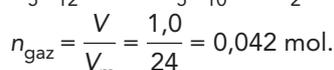
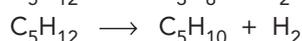
Étape (5) : réaction de substitution. Il se produit une modification de groupe caractéristique.

6. Le nickel Ni constitue le catalyseur dans l'étape (4).

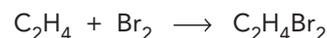
33 Modifications de structures

Expérience 1. D et E.

En effet :



Le dibrome réagit avec les alcènes selon une réaction d'addition :



$n(\text{ène}) = n(\text{Br}_2) = C \cdot V = 4,5 \times 10^{-2} \times 0,420 = 0,0189 \text{ mol}$,
soit $n(\text{ène}) = 18,9 \text{ mmol}$.

Expérience 2. A, B et F.

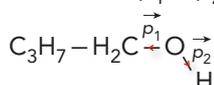
En effet :



C'est une réaction de substitution.

Le butan-1-ol est une molécule polaire, car elle présente deux liaisons polarisées, C-O et O-H.

La somme des moments dipolaires des liaisons correspondantes est non nulle : $\vec{p}_1 + \vec{p}_2 \neq \vec{0}$



$$n_0(\text{ol}) = \frac{d \cdot V \cdot \mu(\text{eau})}{M(\text{ol})} = \frac{25,0 \times 0,80 \times 1,0}{74,0}$$

$$n_0(\text{ol}) = 0,27 \text{ mol}$$

$$n_0(\text{HCl}) = C \cdot V(\text{HCl}) = 0,66 \text{ mol}$$

Le butan-1-ol est le réactif limitant.

$$\text{Rendement} : \rho = \frac{n(\text{RCl})}{n_0(\text{ol})}$$

$$\rho = \frac{m(\text{RCl})}{M(\text{RCl}) \cdot n_0(\text{ol})} = \frac{18,2}{92,5 \times 0,27} = 0,73.$$

Retour sur l'ouverture du chapitre

34 Une matière première importante : le benzène

1. Le liquidambar est un arbre qui produit une résine à l'odeur de cannelle appelée styrax.

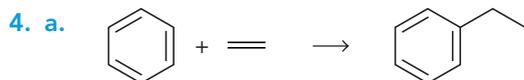
Les zéolithes (du grec : *zeo* signifiant « qui bout » et *lithos* signifiant « pierre ») sont des aluminosilicates hydratés d'origine naturelle ou synthétique.

2. Les pictogrammes de sécurité relatifs au benzène sont :



Le benzène est cancérigène et doit être manipulé avec précaution : travailler sous aspiration, utiliser si nécessaire des appareils de protection respiratoire, et de toute façon des gants et des vêtements de protection.

3. Lors du reformage, les modifications de structure réalisées sont des modifications de la chaîne carbonée à nombre d'atomes de carbone constant, des déshydrocyclisations.



b. Pour le benzène, il s'agit d'une réaction de substitution, pour l'éthène d'une réaction d'addition.

c. Une modification de chaîne a alors été réalisée.

5. a. Il s'agit d'une réaction d'élimination.

b. Les oxydes de magnésium ou de zinc sont des catalyseurs.

6. a. Le styrène a pour formule brute C_8H_8 .
Son pourcentage massique en carbone vaut :

$$P(\text{C}) = \frac{8M(\text{C})}{8M(\text{C}) + 8M(\text{H})} = \frac{8 \times 12,0}{8 \times 12,0 + 8,0}$$

$$P(\text{C}) = 0,923, \text{ soit } 92,3 \%$$

b. Le motif du polystyrène répété un très grand nombre de fois donne la formule du polymère polystyrène.

Ce motif a la même formule brute que le styrène : son pourcentage massique est donc le même que celui du styrène et c'est aussi le cas du polystyrène : $P(\text{C}) = 0,923$, soit 92,3 %.

7. a. $n\text{C}_8\text{H}_8 \rightarrow -(\text{C}_8\text{H}_8)_n-$

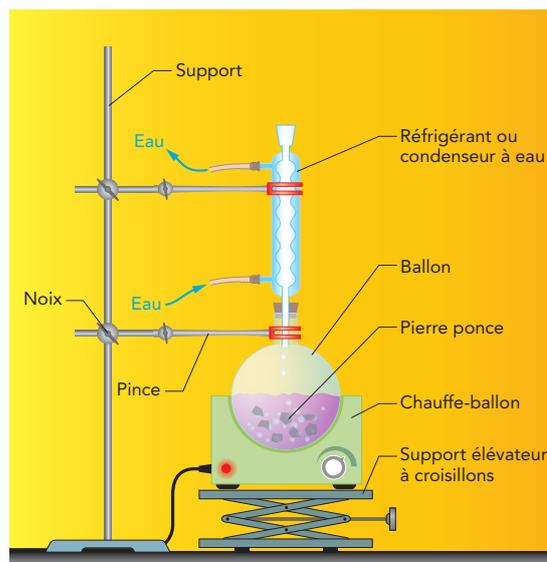
b. Cette polymérisation est une réaction d'addition (en fait de polyaddition).

c. Les molécules constituant le polystyrène sont constituées d'un nombre très important d'atomes, d'où l'appellation de macromolécules.

Comprendre un énoncé

35 Déshydratation d'un alcool

1. Schéma légendé du montage à reflux :



Le chauffage à reflux permet d'augmenter la vitesse de la réaction sans perdre d'espèces chimiques.

2. Si l'espèce B obtenue est un alcène, elle réagit avec le dibrome et décolore de l'eau de dibrome.

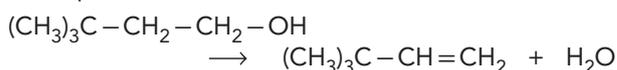
3. On utilise une ampoule à décanter pour séparer la phase organique de la phase aqueuse.

La phase supérieure dans l'ampoule est la phase organique constituée par l'alcène de densité inférieure à 1. La phase aqueuse est la phase inférieure.

4. a. Il y a création d'une double liaison : la réaction est une réaction d'élimination.

b. L'alcène obtenu est le 3,3-diméthylbut-1-ène, de formule

c. L'équation de sa formation s'écrit :



5. L'acide sulfurique n'apparaît pas dans l'équation de la réaction : c'est un catalyseur.

6. Rendement de la synthèse :

$$n_0(\text{ol}) = \frac{d(\text{ol}) \cdot \mu(\text{eau}) \cdot V(\text{ol})}{M(\text{ol})} = \frac{0,812 \times 1,0 \times 30,0}{(6 \times 12,0 + 16,0 + 14,0)}$$
$$n_0(\text{ol}) = 0,24 \text{ mol};$$

$$n'(\text{ène}) = \frac{m'}{M(\text{ène})} = 0,14 \text{ mol};$$

$$\rho = \frac{n'(\text{ène})}{n_0(\text{ol})} = 0,58, \text{ soit } 58 \text{ \%}.$$

Transformations en chimie organique : aspect microscopique

Chapitre

12

Activités

1 Polarisation de liaison (p. 302)

1 L'électronégativité de l'atome A traduit son aptitude à attirer vers lui le doublet d'électrons qui le lie à l'atome B dans une liaison covalente.

Une liaison covalente entre deux atomes A et B est polarisée si ces deux atomes ont des électronégativités différentes.

2 L'électronégativité augmente de la gauche vers la droite dans une période de la classification périodique.

L'électronégativité augmente du bas vers le haut dans une colonne de la classification périodique.

3 a. L'atome le plus électronégatif est l'atome B puisque le doublet d'électrons qui le lie à l'atome A est plus proche de B.

b. D'après la conservation de la charge, $q + q' = 0$, soit $q' = -q$.

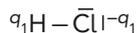
L'atome qui porte la charge négative q' est B puisque le doublet d'électrons qui le lie à A est plus proche de lui.

c. ${}^q\text{A} - \text{B}^{-q}$. La molécule présente deux sites porteurs de deux charges égales et opposées distantes de d , d'où l'appellation de dipôle électrique.

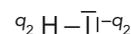
4 a. Les éléments chlore et iode appartiennent tous deux à la famille des halogènes, située à la dix-septième colonne de la classification périodique.

b. et **c.** Le numéro atomique de l'hydrogène est égal à 1 et celui du chlore à 17. Les formules électroniques des atomes correspondants s'écrivent pour H : K^1 et pour Cl : $\text{K}^2\text{L}^8\text{M}^7$.

L'atome d'hydrogène a un électron de valence et l'atome de chlore en possède sept. Il manque un électron à l'atome d'hydrogène pour vérifier la règle du duet et un électron à l'atome de chlore pour vérifier la règle de l'octet. L'atome de chlore possède trois doublets d'électrons non liants. On en déduit la représentation de Lewis de la molécule de chlorure d'hydrogène HCl :



L'iode appartient à la famille des halogènes comme le chlore. La représentation de Lewis de l'iodure d'hydrogène est donc similaire à celle du chlorure d'hydrogène :



d. En effet, l'iode étant situé en dessous du chlore, il est moins électronégatif que lui. La différence d'électronégativité entre l'hydrogène et l'iode est plus faible que la différence d'électronégativité entre l'hydrogène et le chlore. La liaison hydrogène-chlore est plus polarisée que la liaison hydrogène-iode.

5 a. L'électronégativité de l'oxygène est supérieure à celle du carbone : la liaison carbone-oxygène est polarisée. L'atome de carbone porte une charge positive et l'atome d'oxygène porte une charge négative.

b. L'électronégativité du chlore est supérieure à celle du carbone : la liaison carbone-chlore est polarisée. L'atome de carbone porte une charge positive et l'atome de chlore porte une charge négative.

c. Les deux atomes d'oxygène ont la même électronégativité : la liaison entre ces deux atomes n'est pas polarisée.

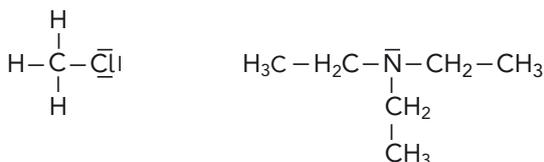
6 Une liaison est polarisée si les deux atomes liés n'ont pas la même électronégativité. L'atome dont l'électronégativité est la plus grande porte la charge négative, car le doublet d'électrons liant est plus proche de lui. L'atome dont l'électronégativité est la plus faible porte la charge positive.

L'électronégativité de l'hydrogène est plus faible que celle du chlore : la liaison chlore-hydrogène est donc polarisée. Dans la molécule de chlorure d'hydrogène H-Cl, l'atome de chlore porte la charge électrique négative et celui d'hydrogène la charge électrique positive.

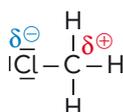
2 Site accepteur ou donneur de doublet d'électrons (p. 302)

1 Cette réaction est une réaction de substitution.

2 Chlorométhane N,N-diéthyléthanamine

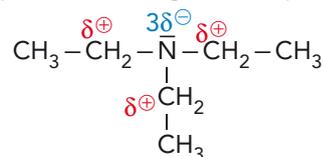


3 L'atome de chlore est plus électronégatif que l'atome de carbone : la liaison chlore-carbone est polarisée. L'atome de chlore porte une charge électrique négative et l'atome de carbone, qui lui est lié, porte une charge électrique positive.



L'atome d'azote est plus électronégatif que l'atome de carbone : les trois liaisons azote-carbone sont

polarisées. L'atome d'azote porte une charge électrique négative et chacun des atomes de carbone qui lui sont liés porte une charge électrique positive.



4 L'atome d'azote est porteur d'un doublet non liant et porte une charge partielle négative : c'est un site donneur de doublet d'électrons.

L'atome de carbone du chlorométhane porte une charge partielle positive : c'est un site accepteur de doublet d'électrons.

5 Lors de la réaction, une liaison s'établit entre l'atome d'azote de l'amine et l'atome de carbone du chlorométhane : l'atome d'azote, site donneur de doublet d'électrons, a donc interagi avec le site accepteur de doublet d'électrons du chlorométhane, l'atome de carbone.

3 Synthèse de l'aspirine (p. 303)

A Présentation

1 a. Cette réaction est une réaction de substitution.

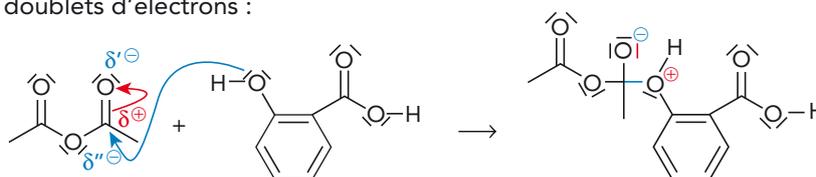
b. Le spectre de RMN de C présenterait un singulet, intégrant pour 3 H, vers 2 ppm, correspondant aux H du groupe CH_3-CO_2-

Le spectre IR de D présenterait une bande d'absorption large et forte entre 2500 et 3200 cm^{-1} , correspondant à l'absorption de la liaison OH du groupe carboxyle.

2 La première étape de ce mécanisme est une réaction d'addition : une des deux doubles liaisons C=O de l'anhydride éthanoïque disparaît.

3 a. Le site donneur de doublet d'électrons mis en jeu est l'atome d'oxygène du groupe hydroxyle lié au cycle benzénique de l'acide salicylique. En effet, cet atome d'oxygène possède deux doublets non liants. Le site accepteur de doublet d'électrons, qui est mis en jeu, est un des deux atomes de carbone de l'anhydride éthanoïque lié à un atome d'oxygène par une double liaison et à un autre atome d'oxygène par une simple liaison. En effet, cet atome de carbone, moins électronégatif que l'oxygène, est lié à deux atomes d'oxygène et porte donc une charge partielle positive.

b. Mouvements des doublets d'électrons :



B Manipulation

Matériel et produits

- Un erlenmeyer de 100 mL ;
- un cristalliseur ;
- un support vertical avec noix et pince ;
- un agitateur magnétique chauffant et un barreau aimanté ;
- un réfrigérant à air ;
- un thermomètre ;
- une spatule ;
- une coupelle de pesée ;
- une baguette de verre ;

- un tube à bouchon vissé fermé contenant 10 mL d'anhydride éthanoïque ;
- une éprouvette graduée de 50 mL ;
- un verre de montre ;
- une cuve à chromatographie (bécher et demi-boîte de Petri) ;
- un chromatoplaque avec pigment fluorescent ;
- une plaque à godet ;
- trois capillaires ;
- une pipette Pasteur ;

- un flacon contenant 11 mL d'éluant (6 mL d'éthanoate de butyle, 4 mL de cyclohexane et 1 mL d'acide méthanoïque);
- un flacon d'acide sulfurique avec un compte-goutte;
- de l'eau distillée glacée.

Prévoir un poste accessible à tous avec :

- une balance avec un flacon d'acide salicylique à côté;
- des glaçons;
- une trompe à eau avec une fiole à vide et un filtre Büchner;
- une lampe UV.

4 On a $n_0(\text{ac.sal.}) = \frac{m}{M} = 0,040 \text{ mol.}$

$n_0(\text{an.ac.}) > n_0(\text{ac.sal.})$ puisque l'anhydride éthanoïque est en excès.

Le rendement de la synthèse s'en déduit :

$$\rho = \frac{n(\text{ac.acé.})}{n_0(\text{ac.sal.})}$$

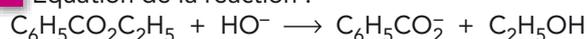
5 Voir la fiche 13 B, p. 598 du manuel, avec comme espèces dissoutes dans un peu d'éluant : l'acide acétylsalicylique synthétisé, de l'aspirine broyée (référence) et de l'acide salicylique.

La révélation du chromatogramme sera faite sous UV.

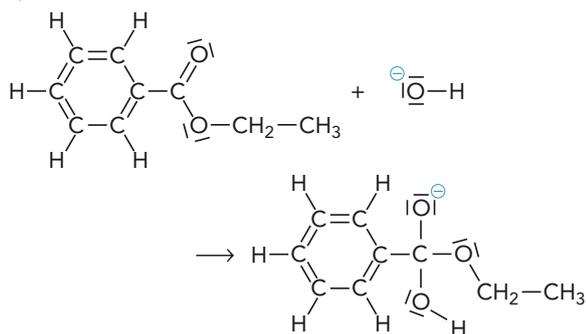
4 Saponification du benzoate d'éthyle (p. 304)

A Présentation

1 Équation de la réaction :

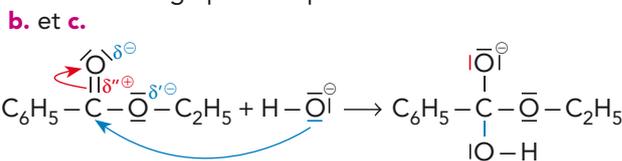


2 À l'échelle microscopique, la réaction se fait en plusieurs étapes. La première de ces étapes a pour équation :



La première étape du mécanisme de la réaction de saponification est une réaction d'addition (la double liaison C=O du groupe ester disparaît).

3 a. Le site donneur de doublet d'électrons mis en jeu est l'atome d'oxygène de l'ion hydroxyde, car il possède trois doublets non liants. Le site accepteur de doublet d'électrons qui est mis en jeu est l'atome de carbone du groupe ester du benzoate d'éthyle. Cet atome de carbone, moins électronégatif que l'oxygène, est lié à deux atomes d'oxygène et porte donc une charge partielle positive.



B Manipulation

Matériel et produits

- Un ballon de 250 mL;
- un réfrigérant à eau;
- un support vertical avec deux noix et deux pinces;
- un support élévateur;
- un chauffe-ballon;
- une cuvette métallique;
- une spatule;
- une pipette jaugée de 5,0 mL munie d'une propipette ou d'un pipeteur;
- une éprouvette graduée de 25 mL;
- un erlenmeyer de 125 mL;
- une baguette de verre;
- un rouleau de papier-pH avec son échelle de teinte;
- du papier-filtre;
- un verre de montre;
- des grains de pierre ponce;
- une cuve à chromatographie (bêcher et demi-boîte de Petri);

- un chromatoplaque avec pigment fluorescent;
- une plaque à godet;
- trois capillaires;
- une pipette Pasteur;
- un flacon contenant 9 mL d'éluant (6 mL de cyclohexane et 3 mL de propanone);
- du benzoate d'éthyle (10 mL);
- une solution d'hydroxyde de sodium à $4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- une solution d'acide chlorhydrique à $4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- de l'acide benzoïque;
- une petite bouteille de cyclohexane.

Prévoir un poste accessible à tous avec :

- une balance;
- une trompe à eau avec une fiole à vide et un filtre Büchner;
- une lampe UV;
- de l'eau chaude à 50°C .

4 On a $n_0(E) = \frac{m}{M} = \rho \cdot \frac{V}{M} = 0,035 \text{ mol}$,

$n_0(\text{HO}^-) = C \cdot V' = 0,1 \text{ mol}$.

$n_0(\text{HO}^-) > n_0(E)$: l'ester est le réactif limitant.

Le rendement de la synthèse s'en déduit :

$$\rho = \frac{n(P)}{n_0(E)}$$

5 Le signal singulet à 12 ppm correspond à l'hydrogène du groupe carboxyle.

Les signaux vers 8 ppm correspondent aux 5 H liés au cycle benzénique.

6 Voir la fiche 13 B, p. 598 du manuel, avec comme espèces dissoutes ou diluées dans un peu de cyclohexane : de l'acide benzoïque synthétisé, de l'acide benzoïque (référence) et du benzoate d'éthyle. La révélation du chromatogramme sera faite sous UV.

7 L'acide benzoïque étant solide, on aurait pu mesurer sa température de fusion.

5 Réduction de la benzophénone (p. 305)

A Présentation

1 Cette réaction est une réaction d'addition, puisque la double liaison du groupe carbonyle disparaît.

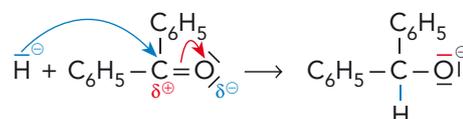
2 La première étape proposée est une réaction d'addition, puisque la double liaison C=O du groupe carbonyle disparaît.

3 a. Le site donneur de doublet d'électrons mis en jeu est l'ion hydrure H^- . En effet, il possède un doublet non liant.

Le site accepteur de doublet d'électrons mis en jeu est l'atome de carbone du groupe carbonyle. En

effet, cet atome de carbone, moins électronégatif que l'oxygène, est lié à un atome d'oxygène et porte donc une charge partielle positive.

b.



B Manipulation

Matériel et produits

- Un ballon de 250 mL ;
- un support vertical avec noix et pince ;
- un agitateur magnétique et un barreau aimanté ;
- une spatule ;
- une coupelle de pesée ;
- une éprouvette graduée de 50 mL ;
- un cristalliseur ;
- un support élévateur ;
- un réfrigérant à eau ;
- un chauffe-ballon ;
- un verre de montre ;
- deux pipettes Pasteur ;
- du papier-filtre ;
- des grains de pierre ponce ;
- une pissette d'eau distillée ;
- une cuve à chromatographie (bêcher et demi-boîte de Petri) ;
- une chromatoplaque avec pigment fluorescent ;
- une plaque à godet ;

- deux capillaires ;
- une petite bouteille d'éthanol à 95° (25 mL) ;
- un flacon contenant 12 mL d'éluant (10 mL de cyclohexane et 2 mL d'éthanoate d'éthyle).

Prévoir un poste accessible à tous avec :

- une balance avec un flacon de benzophénone et un flacon de tétrahydroborate de sodium à côté ;
- des glaçons ;
- de l'eau distillée glacée ;
- une trompe à eau avec une fiole à vide et un filtre Büchner ;
- une lampe UV.

Remarque :

Dans la première étape, on peut utiliser de l'eau chaude du robinet réglée à la température attendue et stockée dans un bidon. La dissolution se fait rapidement et il n'est pas nécessaire d'utiliser un agitateur magnétique chauffant. Les périodes d'attente seront mises à profit pour étudier la partie A et répondre aux questions du TP.

4 On a $n_0(\text{one}) = \frac{m}{M} = 0,011 \text{ mol}$,

$n_0(T) = \frac{m'}{M'} = 0,011 \text{ mol}$.

$\frac{n_0(\text{one})}{4} < n_0(T)$: la benzophénone constitue donc le réactif limitant de cette synthèse.

Le rendement de la synthèse s'en déduit :

$$\rho = \frac{n(\text{ol})}{n_0(\text{one})}$$

5 Dans le spectre IR proposé, la large bande d'absorption vers $3400\text{-}3500 \text{ cm}^{-1}$ est relative à la liaison O-H.

Il n'y a pas la bande d'absorption de la liaison C=O vers 1700 cm^{-1} : le spectre IR est celui du diphénylméthanol.

Dans le spectre de RMN, les signaux vers 7 ppm sont relatifs aux atomes d'hydrogène liés aux deux cycles benzéniques. Le signal vers 5,5 ppm est celui de l'hydrogène lié au carbone central et le signal vers 4,5 ppm est celui relatif à l'atome d'hydrogène du groupe hydroxyle.

6 Voir la fiche 13 B, p. 598 du manuel, avec comme espèces, dissoutes dans un peu d'éluant : du diphénylméthanol synthétisé et de la benzophénone. La révélation du chromatogramme sera faite sous UV.

Bibliographie

Tout livre de chimie de l'enseignement supérieur et en particulier :

- A. DURUPHY (dir.), *Chimie PCSI 1^{re} année*, Hachette, collection HPrepa, 2003.
- A. DURUPHY (dir.) *Chimie PC PC*, 2^e année*, Hachette, collection HPrepa, 2004.
- J. DROUIN, *Introduction à la chimie organique*, Librairie du Cèdre, 2005.
- P. C. VOLLHARDT et N. E. SCHORE, *Traité de chimie organique*, De Boeck, 2004.

Exercices (p. 311-321)

QCM

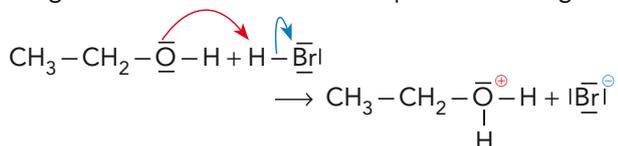
- 1** 1. B et C; 2. C; 3. B; **2** 1. A et C; 2. B; 3. A;
3 1. A et B; 2. B; 3. C.

Application immédiate

4 Expliquer la formation et la rupture de liaisons

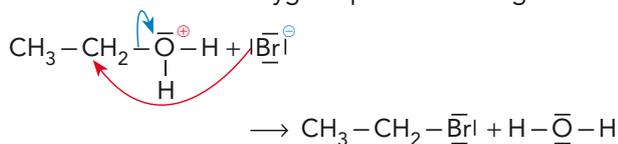
(1) Site donneur : atome d'oxygène porteur de doublets non liants.

Site accepteur de doublet d'électrons : atome d'hydrogène lié à l'atome de brome plus électro-négatif.



(2) Site donneur : ion bromure porteur de doublets non liants.

Site accepteur de doublet d'électrons : atome de carbone lié à l'atome d'oxygène plus électro-négatif.



Pour commencer

5 Utiliser une table d'électronégativités

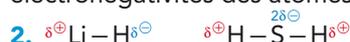
1. Toutes ces liaisons sont polarisées puisque les électronégativités des éléments liés sont différentes. La différence d'électronégativité entre les éléments carbone et soufre étant très faible, la liaison C-S sera peu polarisée.

2. L'électronégativité du carbone étant supérieure à celle du lithium, c'est l'atome de carbone qui porte la charge partielle négative et l'atome de lithium qui porte la charge partielle positive dans la liaison C-Li.

L'électronégativité du carbone étant inférieure à celle de l'azote ou du soufre, c'est l'atome de carbone qui porte la charge partielle positive et l'atome d'azote, ou de soufre, qui porte la charge partielle négative dans les liaisons C-N ou C-S.

6 Déterminer la polarisation d'une liaison

1. Les liaisons H-Li et H-S sont polarisées, car les électronégativités des atomes liés sont différentes.

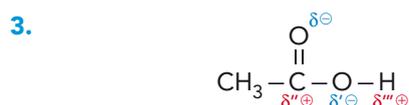


3. La liaison la plus polarisée est la liaison lithium-hydrogène, car la différence d'électronégativité entre les deux atomes liés est la plus importante.

7 Rechercher des liaisons polarisées

1. Les liaisons C-H sont considérées comme non polarisées.

2. Les liaisons carbone oxygène et oxygène hydrogène sont polarisées, car les électronégativités des atomes liés sont différentes.



8 Identifier des sites donneurs ou accepteurs

1. et 2. Les atomes porteurs de doublet d'électrons non liants ou de charges partielles négatives sont des sites donneurs de doublet d'électrons. Les atomes porteurs de charge positive sont des sites accepteurs de doublet d'électrons.

Dans l'éthanal, l'atome d'oxygène constitue le site donneur de doublet d'électrons et l'atome de carbone qui lui est lié constitue le site accepteur de doublet d'électrons.

Dans l'éthanimine, l'atome d'azote constitue le site donneur de doublet d'électrons et l'atome de carbone et les atomes d'hydrogène qui sont liés à l'atome d'azote constituent des sites accepteurs de doublet d'électrons.

9 Rechercher des sites donneurs ou accepteurs

1. a. Dans la molécule d'éthanoate de méthyle, l'atome de carbone lié aux deux atomes d'oxygène

porte une charge partielle positive, car il est lié à deux atomes plus électronégatifs que lui. Les deux atomes d'oxygène porte une charge partielle négative, car ils sont liés à un ou deux atomes de carbone moins électronégatifs qu'eux.

Dans la molécule d'éthanamide, l'atome de carbone lié à un atome d'oxygène et à un atome d'azote porte une charge partielle positive, car il est lié à deux atomes plus électronégatifs que lui. L'atome d'oxygène porte une charge partielle négative, car il est lié à un atome de carbone moins électronégatif que lui.

L'atome d'azote porte une charge partielle négative, car il est lié à un atome de carbone et deux atomes d'hydrogène tous moins électronégatifs que lui. Les deux atomes d'hydrogène liés à l'atome d'azote portent une charge partielle positive, car ils sont liés à un atome d'azote plus électronégatif qu'eux.

b. Dans l'éthanoate d'éthyle, l'atome de carbone lié à l'atome d'oxygène porte une charge partielle positive, car il est lié à un atome d'oxygène plus électronégatif que lui. Par contre, l'autre atome de carbone ne porte pas de charge partielle puisqu'il est lié à un autre atome de carbone et à des atomes d'hydrogène et qu'on considère les liaisons carbone-hydrogène comme non polarisées.

2. Les atomes porteurs de doublet d'électrons non liants ou de charges partielles négatives sont des sites donneurs de doublet d'électrons. Les atomes porteurs de charge positive sont des sites accepteurs de doublet d'électrons.

a. Dans l'éthanoate d'éthyle, les deux atomes d'oxygène porteurs de doublet d'électrons non liants sont des sites donneurs de doublet d'électrons.

Dans l'éthanamide, l'atome d'oxygène et l'atome d'azote porteurs de doublet d'électrons non liants sont des sites donneurs de doublet d'électrons.

b. Dans l'éthanoate d'éthyle, les deux atomes de carbone liés à un ou des atomes d'oxygène sont des sites accepteurs de doublet d'électrons.

Dans l'éthanamide, l'atome de carbone et les deux atomes d'hydrogène porteurs de charges partielles positives sont des sites accepteurs de doublet d'électrons.

10 Localiser des sites donneurs ou accepteurs

Iodoéthane :

1. Liaison C-I polarisée.
2. $\delta^{\oplus}\text{C}-\text{I}^{\delta^{\ominus}}$
3. Le site accepteur C lié à I ; le site donneur I.

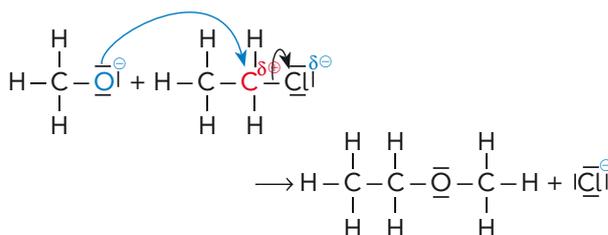
Méthanol :

1. Liaison C-O et O-H polarisées.
2. $\delta^{\oplus}\text{C}-\text{O}^{\delta^{\ominus}}$ et $\text{O}^{\delta^{\ominus}}-\text{H}^{\delta^{\oplus}}$
3. Les sites accepteurs C et H liés à O ; le site donneur O.

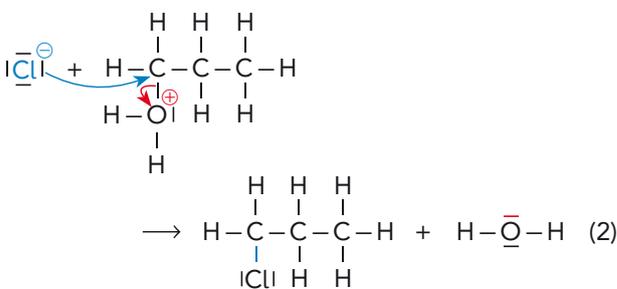
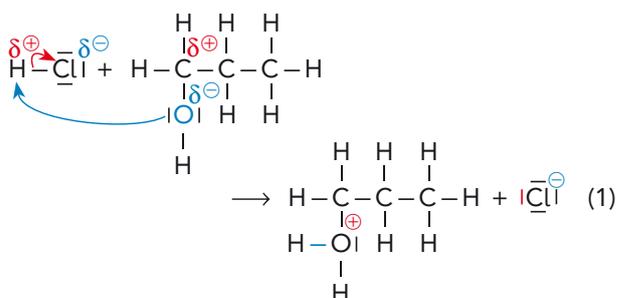
11 Choisir une représentation de mouvement des doublets d'électrons

La proposition correcte est la proposition III. En effet, la flèche tracée part d'un doublet d'électrons et arrive vers le site accepteur. Elle traduit la liaison formée entre le site donneur O et le site accepteur C[⊕].

12 Représenter le mouvement des doublets d'électrons



13 Expliquer la formation et la rupture de liaisons



Pour s'entraîner

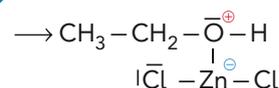
14 À chacun son rythme

1. Les liaisons C-O, O-H et Zn-Cl sont polarisées, car les électronégativités des atomes liés sont différentes.

2. $\delta^{\oplus}\text{C}-\text{O}^{\delta^{\ominus}}$; $\text{O}^{\delta^{\ominus}}-\text{H}^{\delta^{\oplus}}$; $\delta^{\oplus}\text{Zn}-\text{Cl}^{\delta^{\ominus}}$

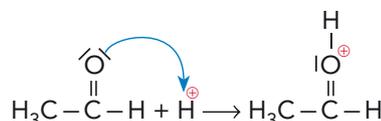
3. Le site donneur de doublet d'électrons mis en jeu est l'atome d'oxygène de l'éthanol, et le site accepteur de doublet d'électrons est l'atome de zinc.

4. $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{O}^{\ominus}-\text{H} + \text{I}^{\ominus}-\text{Zn}-\text{Cl}^{\ominus}$



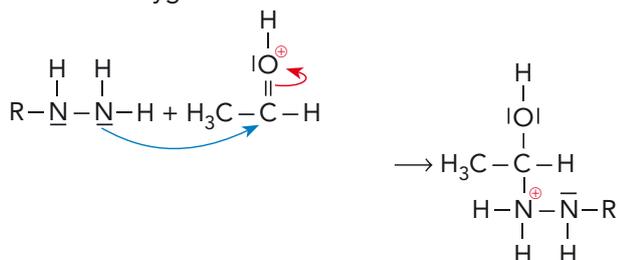
15 Test à la 2,4-DNPH

1. et **2.** Équation (1) : le site donneur de doublet d'électrons mis en jeu est l'atome d'oxygène, et le site accepteur de doublet d'électrons est l'ion H⁺.



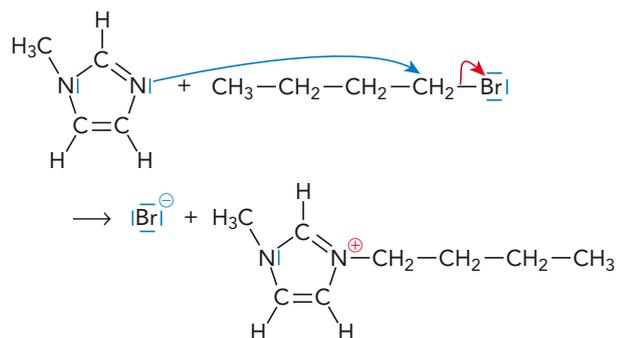
Équation (2) : le site donneur de doublet d'électrons mis en jeu est l'atome d'azote, et le site accepteur de

doublet d'électrons est l'atome de carbone lié à l'atome d'oxygène.



16 Un nouveau type de solvant

1. a., b. et 2. b.



Pour respecter la règle de l'octet, les atomes d'azote et de brome portent des doublets non liants dans les réactifs.

2. a. Les deux atomes d'azote portent un doublet d'électrons non liants : ce sont des sites donneurs de doublet d'électrons. L'atome d'azote doublement lié à un atome de carbone est le site donneur de doublet d'électrons mis en jeu dans la réaction.

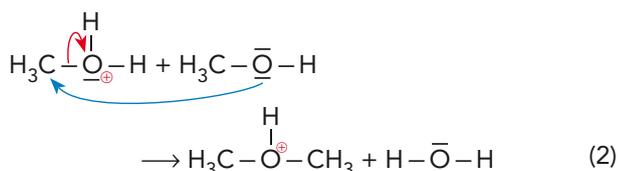
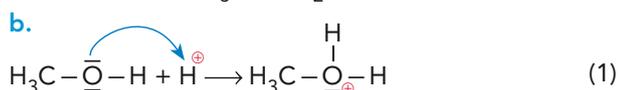
Dans le 1-bromométhane, l'atome de carbone lié à l'atome de brome porte une charge partielle positive puisqu'il est lié à un atome plus électronégatif que lui : c'est le site accepteur de doublet d'électrons mis en jeu dans la réaction.

3. a. Le cyclohexane et l'éthanoate d'éthyle sont des solvants utilisés en chimie organique.

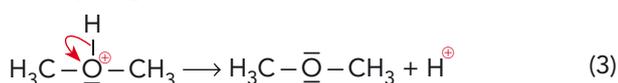
b. Les liquides ioniques sont des solvants non volatiles, non inflammables et ils peuvent être recyclés facilement.

17 Biocarburant du futur ?

1. a. Étape (1) : site donneur O et site accepteur H⁺. Étape (2) : site donneur O du méthanol et site accepteur C du cation H₃C-OH₂⁺.



2. Il se forme du méthoxyméthane CH₃OCH₃ et des ions hydrogène H⁺.



3. La biomasse désigne toute matière organique végétale ou animale.

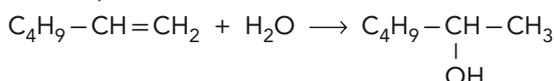
Un biocarburant est un carburant produit à partir de matériaux organiques non fossiles, provenant de la biomasse.

La synthèse de biocarburant constitue une voie de synthèse supplémentaire de carburant dont le bilan carbone est neutre, car le dioxyde de carbone émis lors de la combustion du biocarburant a été préalablement utilisé lors de la croissance du végétal.

Pour aller plus loin

18 Hydratation de l'hex-1-ène

1. a. Équation de la réaction :



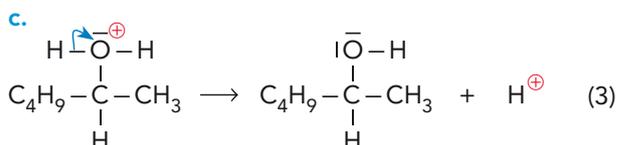
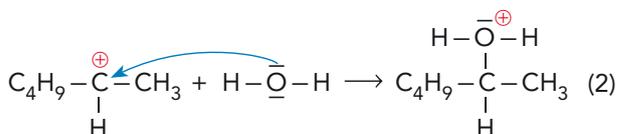
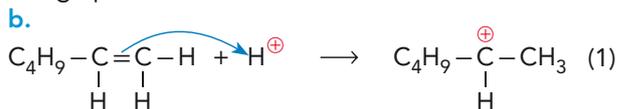
b. Cette réaction est une réaction d'addition.

c. Au cours de cette réaction, un changement de groupe caractéristique se produit.

2. L'apparition de la bande d'absorption large et forte de la liaison O-H, entre 3300 et 3400 cm⁻¹, et la disparition de la bande d'absorption de la liaison C-H, vers 3100 cm⁻¹, et de la bande d'absorption de la liaison C=C, vers 1650 cm⁻¹, permettent de vérifier que l'alcène de départ a été hydraté.

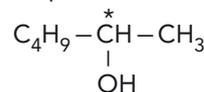
3. a. Dans l'étape (1), le site donneur de doublet d'électrons est la double liaison C=C. Le site accepteur de doublet d'électrons est l'ion hydrogène H⁺ puisqu'il porte une charge positive.

Dans l'étape (2), le site donneur de doublet d'électrons est l'atome d'oxygène, car il possède deux doublets non liants. Le site accepteur de doublet d'électrons est l'atome de carbone porteur d'une charge positive.



4. Les ions hydrogène apportés par l'acide sulfurique n'apparaissent pas dans le bilan de la réaction, mais interviennent dans le mécanisme réactionnel : ils catalysent la réaction.

5. L'hexan-2-ol est chiral puisqu'il possède un atome de carbone asymétrique C* :



Représentation de Cram des deux énantiomères de l'hexan-2-ol :



6. L'eau est le réactif en excès.

La quantité d'hex-1-ène vaut :

$$n(\text{ène}) = \frac{d \cdot \mu(\text{eau}) \cdot V}{M(\text{ène})} = \frac{0,67 \times 1,0 \times 20}{(6 \times 12 + 12)} = 0,16 \text{ mol.}$$

La quantité d'hexan-2-ol obtenu vaut :

$$n(\text{ol}) = \frac{m}{M(\text{ol})} = \frac{8,22}{(6 \times 12 + 16 + 14)}$$

$$n(\text{ol}) = 8,06 \times 10^{-2} \text{ mol.}$$

Le rendement de cette synthèse s'en déduit :

$$\rho = 0,51, \text{ soit } 51 \text{ \%.}$$

19 Hydratation du chloral

1. a. Cette réaction est une réaction d'addition.

b. Une modification de groupe caractéristique s'est produite au cours de cette réaction.

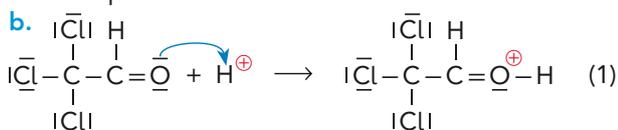
2. a. L'apparition de la bande d'absorption large et forte de la liaison O–H, vers 3300 et 3400 cm^{-1} , et la disparition de la bande d'absorption de la liaison C=O, vers 1700 cm^{-1} , permettent de vérifier que le chloral a bien été hydraté.

b. On observera deux signaux dans le spectre de RMN de l'hydrate de chloral de multiplicité 1.

3. a. Le chloral comporte trois atomes de chlore et un atome d'oxygène, tous porteurs de doublet non liants : ces atomes sont des sites donneurs de doublet d'électrons.

Les deux atomes de carbone du chloral sont liés à des atomes plus électronégatifs qu'eux ; ces atomes de carbone portent donc des charges partielles positives et sont des sites accepteurs de doublet d'électrons.

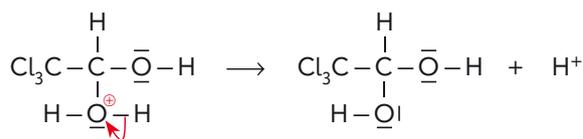
L'ion hydrogène porte une charge positive ; il est un site accepteur de doublet d'électrons.



4. Dans l'étape (2), la flèche courbe partant d'un des doublets d'électrons non liants de l'atome d'oxygène de la molécule d'eau et allant jusqu'à l'atome de carbone lié à l'atome d'oxygène traduit l'interaction qui a lieu entre l'oxygène, site donneur de doublet d'électrons, et le carbone, site accepteur de doublet d'électrons (puisque'il est lié à un atome d'oxygène plus électronégatif que lui). Elle explique la formation de la liaison entre ces deux atomes.

Comme l'atome de carbone ne peut pas être entouré de plus de quatre doublets pour respecter la règle de l'octet, une des liaisons qu'il engageait se rompt lorsque la liaison entre cet atome et l'atome d'oxygène de la molécule d'eau s'établit : un des deux doublets d'électrons de la double liaison C=O bascule ainsi sur l'atome d'oxygène (atome le plus électronégatif), ce que traduit la flèche courbe rouge.

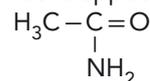
5. Les produits formés lors de l'étape (3) sont un ion hydrogène H^+ et le chloral $\text{Cl}_3\text{C}-\text{CH}(\text{OH})_2$.



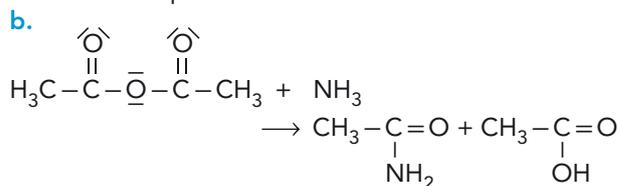
6. Les ions hydrogène présents dans le milieu acide n'apparaissent pas dans le bilan de la réaction, mais interviennent dans le mécanisme réactionnel : ils catalysent la réaction.

20 Synthèse de l'éthanamide

1. a. La formule semi-développée de l'éthanamide est :



L'éthanamide possède la fonction amide.



c. Cette réaction est une réaction de substitution.

2. a. Le spectre IR permet de vérifier la présence du groupe caractéristique du produit grâce à la présence des deux bandes d'absorption de la liaison N–H du groupe NH_2 , vers 3400 et 3200 cm^{-1} , et de la bande d'absorption de la liaison C=O, vers 1690 cm^{-1} .

b. Le spectre de RMN de l'éthanamide fera apparaître deux signaux de multiplicité 1.

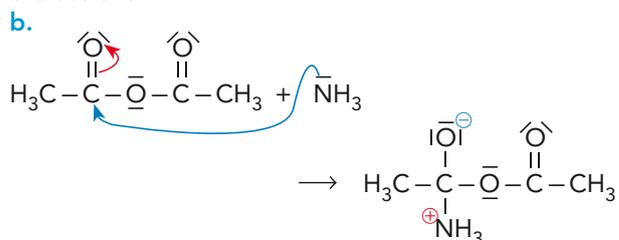
3. Pour l'étape (1) :

a. Les atomes d'oxygène de l'anhydride éthanique, porteurs de doublets non liants, sont des sites donneurs d'électrons.

Les atomes de carbone qui leur sont liés portent des charges partielles positives puisqu'ils sont liés à des atomes plus électronégatifs qu'eux ; ce sont des sites accepteurs de doublet d'électrons.

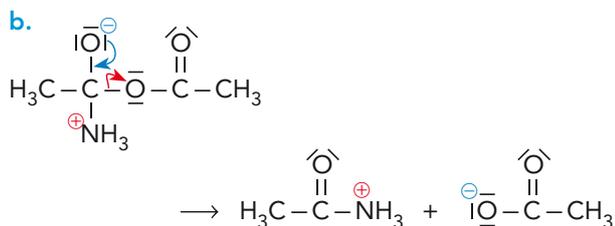
L'atome d'azote de l'ammoniac porte un doublet non liant ; il est donc un site donneur de doublet d'électrons.

Les atomes d'hydrogène liés à l'atome d'azote, plus électronégatif qu'eux, portent des charges partielles positives ; ils sont des sites accepteurs de doublet d'électrons.

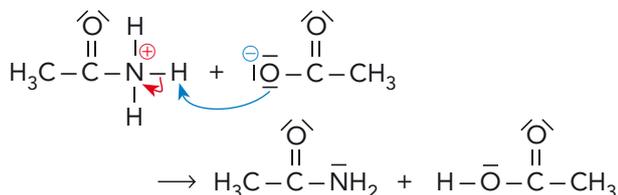


Pour l'étape (2) :

a. Les atomes d'oxygène, porteurs de doublets non liants, sont des sites donneurs de doublet d'électrons. Les atomes de carbone qui leur sont liés portent des charges partielles positives puisqu'ils sont liés à des atomes plus électronégatifs qu'eux ; ce sont des sites accepteurs de doublet d'électrons.



4. Les produits formés lors de la troisième étape sont l'éthanamide et l'acide éthanóïque :



5. a. La réaction de l'étape (2) est une réaction d'élimination.

b. La réaction de synthèse étudiée est en fait une réaction d'addition-élimination, puisque sa première étape est une réaction d'addition, et sa seconde étape une réaction d'élimination.

21 Electron donors and electron acceptors

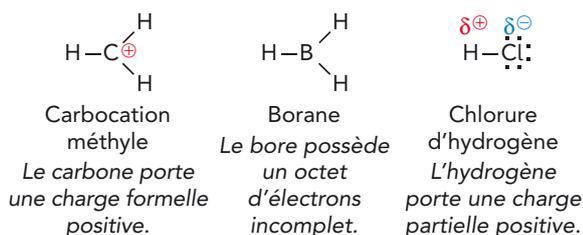
Traduction du texte :

« En raison de l'omniprésence des donneurs de doublet d'électrons et des accepteurs de doublet d'électrons dans les réactions organiques, nous attribuons des appellations particulières et distinctes à ces espèces.

Une molécule ou un ion qui accepte un doublet d'électrons pour établir une nouvelle liaison covalente est appelée un électrophile (du grec signifiant "qui aime les électrons").

[...] Toute molécule, ion ou atome qui est déficient en électrons de quelque façon que ce soit peut se comporter comme un électrophile. [...]

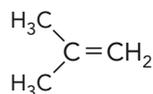
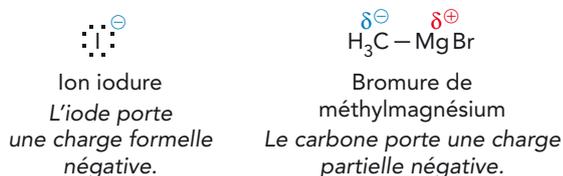
Électrophiles types



Une molécule ou un ion qui donne un doublet d'électrons pour former une nouvelle liaison covalente est appelée un nucléophile (du grec signifiant "qui aime les noyaux").

[...] Toute molécule, ion ou atome qui possède des électrons qui peuvent être partagés peut être un nucléophile. [...]

Nucléophiles types



Isobutène
Liaison C=C.



Ammoniac
Doublet d'électrons non liant
de l'azote.

L'étude des mécanismes de réaction est au cœur de l'étude de la chimie organique à tout niveau. Par conséquent, l'identification des électrophiles et des nucléophiles est une compétence essentielle en chimie organique. L'examen d'une structure... est une façon de déterminer comment une molécule ou ion peut se comporter dans une réaction. Une autre façon consiste à examiner les flèches courbes. Parce que les électrons circulent d'un site donneur d'électrons vers un site déficient en électrons, une flèche courbe va d'un nucléophile vers un électrophile ».

Extrait d'un didacticiel du site Internet de l'université de Los Angeles.

1. a. Seul l'atome de chlore respecte la règle de l'octet dans les électrophiles dont les représentations de Lewis sont données.

Les « .. » représentent les doublets d'électrons non liants.

b. Dans le « méthyl carbocation », le site accepteur de doublet d'électrons est le carbone, car il porte une charge positive et ne respecte pas la règle de l'octet.

Dans le borane, le site accepteur de doublet d'électron est l'atome de bore puisqu'il lui manque un doublet d'électrons pour être entouré d'un octet d'électrons.

c. Dans la molécule HCl, la liaison entre les atomes de chlore et d'hydrogène est polarisée. Comme l'atome de chlore porte une charge partielle négative et l'atome de carbone une charge partielle positive, l'atome de chlore est plus électronégatif que l'atome d'hydrogène.

d. Un électrophile est une espèce avide d'électrons; il possède donc un site accepteur de doublet d'électrons.

2. a. Les liaisons N-H sont polarisées puisqu'un atome d'azote est plus électronégatif qu'un atome d'hydrogène. Dans la molécule d'ammoniac, c'est donc l'atome d'azote qui porte une charge partielle négative, chacun des atomes d'hydrogène qui lui sont liés portant une charge partielle positive.

b. Dans l'ion iodure, l'iode est un site donneur de doublet d'électrons.

Dans le bromure de méthylmagnésium, l'atome de carbone porte une charge partielle négative et constitue le site donneur de doublet d'électrons.

Dans l'isobutylène, c'est la double liaison qui constitue le site donneur de doublet d'électrons.

Dans l'ammoniac, c'est l'atome d'azote qui porte un doublet non liant.

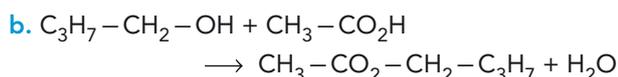
c. Un nucléophile est une espèce qui est attirée par les noyaux, entités chargées positivement, car il possède un ou des doublet(s) d'électrons non liants et/ou porteur de charge partielle négative; il possède donc un site donneur de doublet d'électrons.

3. Les accepteurs de doublet d'électrons ont un déficit électronique (charge positive, défaut d'électrons

par rapport à la règle de l'octet). Les donneurs de doublet d'électrons sont des entités qui possèdent des doublets d'électrons qui peuvent être partagés (liaison multiple, site porteur de doublet non liant, site porteur de charge négative entière ou partielle). Le texte propose également de considérer la localisation des flèches courbes puisqu'elles partent toujours d'un site donneur de doublet d'électrons et arrivent vers un site accepteur de doublet d'électrons.

22 Synthèse d'un arôme

1. a. Une fonction ester.

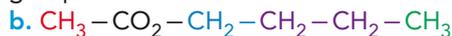


c. La réaction est une réaction de substitution.

2. $n(\text{E}) = d \cdot \mu(\text{eau}) \cdot \frac{V(\text{E})}{M(\text{E})} = 0,075 \text{ mol};$

$$\rho = \frac{n(\text{E})_{\text{obt}}}{n(\text{E})_{\text{att}}} = \frac{n(\text{E})}{n_0(\text{ol})} = 0,75, \text{ soit } 75 \%$$

3. a. Le spectre IR permet de justifier que le produit obtenu est un ester puisqu'il ne présente plus la bande d'absorption du groupe hydroxyle de l'alcool ou du groupe carboxyle de l'acide carboxylique, mais présente la bande d'absorption du groupe C=O du groupe ester.



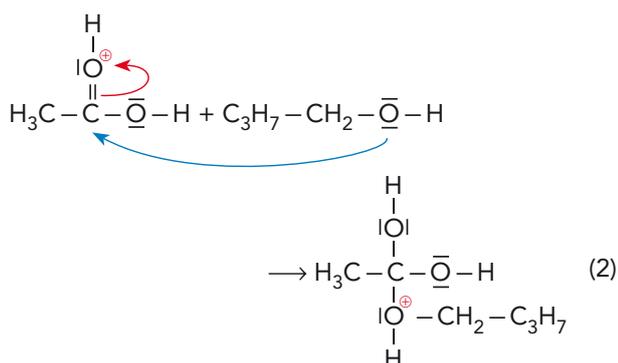
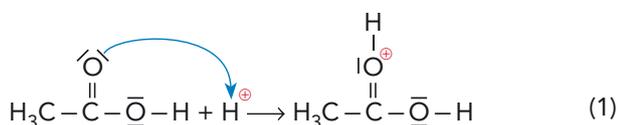
Dans le spectre de RMN :

- le **signal singulet à 2 ppm** peut être attribué au groupe méthyle CH_3 ;
- le **signal triplet à 4 ppm** peut être attribué au groupe CH_2 ;
- le **signal diffus vers 1,5 ppm** intégrant pour 4 H est attribué à CH_2-CH_2- ;
- le **signal triplet intégrant pour 3 H vers 1 ppm** est attribué au groupe méthyle.

4. a. *Étape (1)* : le site donneur de doublet d'électrons O de C=O et le site accepteur de doublet d'électrons H^+ .

Étape (2) : le site donneur de doublet d'électrons O du butan-1-ol et le site accepteur de doublet d'électrons C lié aux atomes d'oxygène du cation $\text{H}_3\text{C}-\text{CO}_2\text{H}^+$.

b.



23 Réduction du benzile

1. a. La température de fusion du produit obtenu est égale à 136 °C : il s'agit de l'hydrobenzoïne B_1 .

b. Ce produit est achiral puisqu'il possède un centre de symétrie situé au milieu de la liaison entre les deux atomes de carbone tétraédriques.

2. On a $n_0(\text{A}) = \frac{m_0}{M(\text{A})} = 9,5 \times 10^{-3} \text{ mol},$

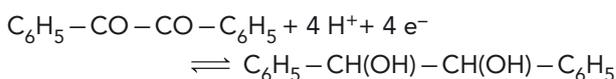
$$n_0(\text{NaBH}_4) = \frac{m}{M(\text{NaBH}_4)} = 1,06 \times 10^{-2} \text{ mol}.$$

$$\frac{n_0(\text{A})}{2} < n_0(\text{NaBH}_4) : \text{le benzile est le réactif limitant}.$$

Le rendement de la synthèse s'en déduit :

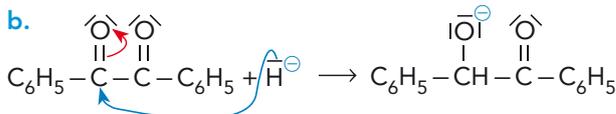
$$\rho = \frac{n(\text{B})}{n_0(\text{A})} = \frac{m'}{M(\text{B}) \cdot n_0(\text{A})} = 0,785, \text{ soit } 78,5 \%$$

3. On peut établir la demi-équation d'oxydoréduction suivante :



La réaction mise en jeu correspond à une réduction du benzile.

4. a. Dans le benzile, les atomes d'oxygène portent des doublets non liants et constituent des sites donneurs de doublet d'électrons. Les atomes de carbone liés aux atomes d'oxygène, plus électronégatifs qu'eux, portent des charges partielles positives et constituent des sites accepteurs de doublet d'électrons. L'ion hydrure porteur d'un doublet non liant constitue un site donneur de doublet d'électrons.



5. Le spectre IR proposé est celui de l'hydrobenzoïne : il présente une bande d'absorption intense, vers 3400-3500 cm^{-1} , et pas de bande d'absorption, vers 1700 cm^{-1} , pour la liaison C=O.

Le spectre de RMN proposé est celui de l'hydrobenzoïne, car il présente :

- un signal vers 7 ppm pour les protons des deux cycles benzéniques;
- deux signaux vers 5,5 ppm pour les protons des groupes hydroxyle et vers 4,5 ppm pour les protons liés aux atomes de carbone tétraédriques.

24 Composés organométalliques

1. b. c. et d. En effet :



Les charges partielles portées par les atomes de carbone repérés en rouge n'ont pas le même signe.

En effet, dans le premier cas, l'atome de carbone est lié à un atome de chlore plus électronégatif que lui et porte une charge partielle positive.

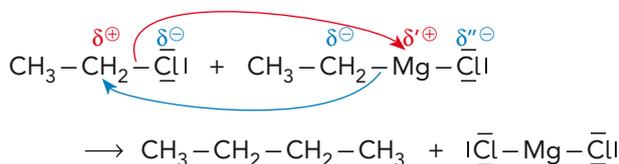
Dans le second cas, l'atome de carbone est lié à un atome de magnésium moins électronégatif que lui et porte une charge partielle négative.

Les charges partielles portées par les atomes de chlore ont le même signe, car, dans chacun des cas proposés, l'atome de chlore est lié à un atome moins électronégatif que lui, que ce soit le carbone ou le magnésium.

La liaison entre un atome de magnésium et un atome de chlore est plus polarisée que la liaison entre un atome de carbone et un atome de chlore, car la différence d'électronégativité entre un atome de chlore et un atome de magnésium est plus grande que la différence d'électronégativité entre un atome de chlore et un atome de carbone.

L'atome de carbone lié à l'atome de magnésium constitue un site donneur de doublet d'électrons puisqu'il porte une charge partielle négative.

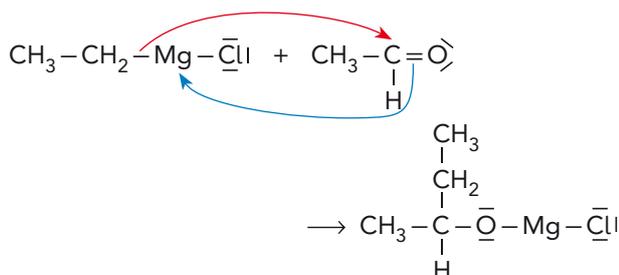
2. a. et b. Mécanisme de réaction :



La réaction est une réaction de substitution. L'atome de chlore du chloroéthane est substitué par le groupe éthyle de l'organomagnésien et dans l'organomagnésien le groupe éthyle est remplacé par l'atome de chlore.

Les flèches courbes partent du site donneur de doublet d'électrons vers le site accepteur de doublet d'électrons.

3. b. En effet, l'éthanal possède un groupe carbonyle.



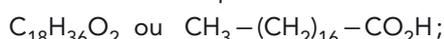
La réaction est une réaction d'addition puisque la double liaison du groupe carbonyle disparaît.

Retour sur l'ouverture du chapitre

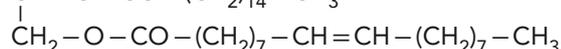
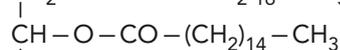
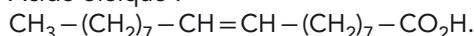
25 Histoire du savon

1. Le suif est un produit issu des graisses animales. Les cendres contiennent de l'hydroxyde de potassium; cette opération permet d'obtenir une solution contenant de l'hydroxyde de potassium, $\text{K}^+(\text{aq}) + \text{HO}^-(\text{aq})$.

2. a. Acide stéarique :



Acide oléique :



c. $n(\text{G}) = \frac{m}{M(\text{G})} = 1,5 \text{ mol}$

On obtient une quantité égale de stéarate de sodium SNa, de palmitate de sodium PNa et d'oléate de sodium ONa, d'où les masses de chacun de ces carboxylates de sodium :

$$m(\text{SNa}) = n(\text{G}) \cdot M(\text{SNa}) = 4,6 \times 10^2 \text{ g};$$

$$m(\text{PNa}) = n(\text{G}) \cdot M(\text{PNa}) = 4,2 \times 10^2 \text{ g};$$

$$m(\text{ONa}) = n(\text{G}) \cdot M(\text{ONa}) = 4,6 \times 10^2 \text{ g}.$$

On en déduit la masse de savon obtenu :

$$m' = m(\text{SNa}) + m(\text{PNa}) + m(\text{ONa}) = 1,34 \times 10^3 \text{ g}.$$

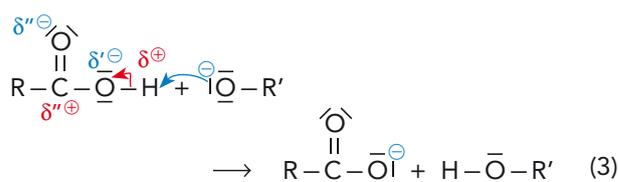
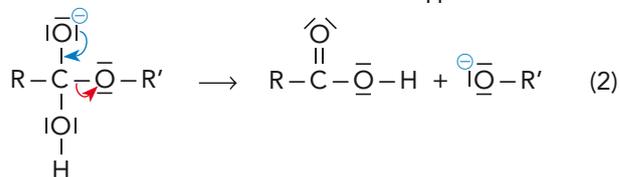
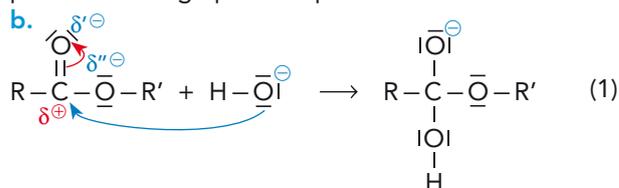
3. Le caractère acide des acides carboxyliques est dû au groupe carboxyle qui peut libérer un ion hydrogène H^+ . Lors de la saponification des corps gras, on obtient des ions carboxylate RCO_2^- . On peut donc obtenir les acides carboxyliques correspondants et du propane-1,2,3-triol ou glycérine à partir du corps gras triester; l'ester ne possède pas d'atome d'hydrogène lié à un atome d'oxygène et, ne pouvant libérer d'ions hydrogène, n'est pas acide.

4. Marseille est un port proche des lieux de production de l'huile d'olive du midi de la France.

5. a. Étape (1) : le site donneur de doublet d'électrons est l'atome d'oxygène de l'ion hydroxyde, car il possède des doublets non liants. Le site accepteur de doublet d'électrons de l'ester est l'atome de carbone du groupe ester qui, lié à deux atomes d'oxygène plus électronégatifs que lui, porte une charge partielle positive.

Étape (2) : le site donneur de doublet d'électrons est l'atome d'oxygène qui porte la charge négative, car il possède des doublets non liants. Le site accepteur de doublet d'électrons est l'atome de carbone lié à deux atomes d'oxygène plus électronégatifs que lui et qui porte une charge partielle positive.

Étape (3) : Le site donneur de doublet d'électrons est l'atome d'oxygène de l'ion RO^- , car il possède des doublets non liants. Le site accepteur de doublet d'électrons est l'atome d'hydrogène qui est lié à un atome d'oxygène plus électronégatif que lui, et qui porte une charge partielle positive.



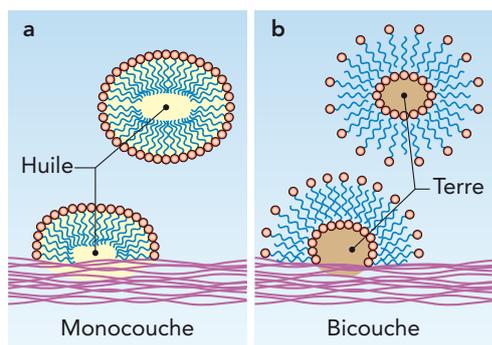
6. a. Les liaisons dans le groupement alkyle sont des liaisons C-C et C-H; elles ne sont pas polarisées.

b. Les liaisons dans le groupe carboxylate sont les liaisons C=O et C-O; elles sont polarisées, car

l'atome d'oxygène est plus électronégatif que l'atome de carbone.

c. L'ion carboxylate a des affinités avec les molécules d'eau, car le groupe CO_2^- peut engager des liaisons hydrogène avec les molécules d'eau. L'ion carboxylate a des affinités avec les chaînes carbonées des graisses, car il possède une longue chaîne carbonée qui peut interagir par liaisons de Van der Waals avec les chaînes carbonées des graisses.

d. Ces propriétés permettent d'expliquer l'utilisation du savon comme détergent. L'ion carboxylate peut interagir avec les molécules d'eau, mais aussi avec les chaînes carbonées des graisses. Selon la nature de la salissure, l'ion carboxylate interagit par son extrémité CO_2^- ou par sa chaîne carbonée. Il se forme ainsi autour de la salissure une monocouche ou une bicouche de savon :



Comprendre un énoncé

26 Synthèse du 1-chlorobutane

1. Équation de la réaction :



2. a. Les bandes d'absorption caractéristiques du butan-1-ol sont la bande large et forte, entre 3200 et 3500 cm^{-1} , correspondant à la liaison $\text{O}-\text{H}$, et la bande, vers 1450 cm^{-1} , correspondant à la liaison $\text{C}-\text{O}$.

b. On pourrait suivre l'évolution du système réactionnel en étudiant l'évolution de la valeur de l'absorbance du mélange réactionnel à une longueur d'onde voisine de 3300 cm^{-1} .

3. Cette réaction est une réaction de substitution : le groupe hydroxyle est remplacé par un atome de chlore.

4. a. La liaison entre l'atome de chlore et celui d'hydrogène est polarisée puisque les électronégativités de ces deux atomes sont différentes.

L'atome de chlore étant plus électronégatif que l'atome d'hydrogène, l'atome de chlore porte une charge partielle négative et celui d'hydrogène porte une charge partielle positive.

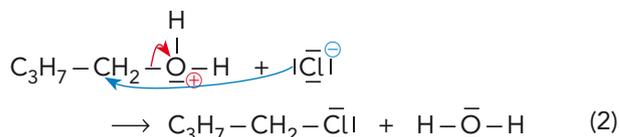
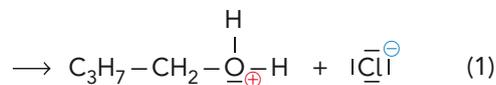
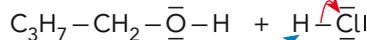
b. Les liaisons établies par l'atome d'oxygène sont polarisées, car l'atome d'oxygène est lié à un atome de carbone et à un atome d'hydrogène, les électronégativités de ces atomes différant toutes entre elles. L'atome d'oxygène étant plus électronégatif que les atomes d'hydrogène et de carbone, il porte une charge partielle négative dans le butan-1-ol.

5. a. Étape (1) : le butan-1-ol possède un site donneur de doublet d'électrons, l'atome d'oxygène, puisqu'il possède deux doublets non liants : c'est le site donneur de doublet d'électrons mis en jeu dans cette étape. Il possède deux sites accepteurs de doublet d'électrons : l'atome d'hydrogène et l'atome de carbone liés à l'atome d'oxygène. En effet, ces deux atomes portent des charges partielles positives.

Le chlorure d'hydrogène possède un site donneur de doublet d'électrons : l'atome de chlore, qui possède trois doublets non liants. Il possède aussi un site accepteur de doublet d'électrons, l'atome d'hydrogène, qui porte une charge partielle positive. Cet atome d'hydrogène est le site accepteur de doublet d'électrons mis en jeu dans cette étape.

Étape (2) : l'ion chlorure est un site donneur de doublet d'électrons, car il possède quatre doublets non liants. Le cation possède un site accepteur de doublet d'électrons : l'atome de carbone lié à l'atome d'oxygène. En effet, l'oxygène étant plus électronégatif que le carbone, l'atome de carbone porte une charge partielle positive.

b.



$$\begin{aligned} 6. \text{ On a } n_0(\text{ol}) &= \frac{\rho(\text{ol}) \cdot V(\text{ol})}{M(\text{ol})} \\ &= \frac{0,80 \times 25,0}{4 \times 12,0 + 10,0 + 16,0} \\ &= 0,27 \text{ mol,} \end{aligned}$$

$$n_0(\text{HCl}) = c \cdot V(\text{ac}) = 0,77 \text{ mol.}$$

$n_0(\text{ol}) < n_0(\text{HCl})$: le butan-1-ol est le réactif limitant.

Le rendement de la synthèse s'en déduit :

$$\begin{aligned} R &= \frac{n(\text{RCl})}{n_0(\text{ol})} = \frac{m}{M(\text{RCl}) \cdot n_0(\text{A})} \\ &= \frac{17,5}{0,27 \times 4 \times 12,0 + 9,0 + 35,5} = 0,70, \\ &\text{soit } 70 \%. \end{aligned}$$

Réaction chimique par échange de proton

Chapitre

13

Activités

1 Mesures de pH de solutions aqueuses (p. 324-325)

Matériel et produits

Paillasse professeur

- Une balance électronique à 0,01 g;
- 1,0 L de solution S_1 d'acide éthanóïque à la concentration $C_1 = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- de l'acide éthanóïque pur;
- 1,0 L de solution S_2 d'acide chlorhydrique à la concentration $C_2 = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- de l'éthanoate de sodium solide, $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Na}$ (s).

Paillasse élève

- Trois béchers de 150 mL;
- deux éprouvettes graduées de 100 mL;
- un pH-mètre avec une sonde pH-métrique;
- un thermomètre;
- un compte-gouttes;
- une capsule de pesée;
- une spatule métallique;
- un agitateur magnétique et un barreau aimanté;
- des solutions étalon pour étalonner le pH-mètre;
- de l'eau distillée.

A Solutions aqueuses d'acides

1 Eau distillée : pH = 5,7.

Eau distillée + acide éthanóïque pur : pH = 4,3.

Lors de l'ajout de l'acide éthanóïque pur dans l'eau distillée, le pH diminue : une réaction chimique a donc eu lieu.

2 Eau distillée :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-5,7} = 2,0 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

Eau distillée + acide éthanóïque pur :

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-4,3} = 5,0 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

3 pH de la solution S_1 : pH = 3,4. Voir tableau ci-dessous.

4 L'eau étant le solvant de la solution, donc l'espèce en excès, l'avancement maximal sera atteint

($x_f = x_{\text{max}}$) si l'acide éthanóïque est totalement consommé :

$$C_1 \cdot V_1 - x_{\text{max}} = 0, \text{ soit } x_{\text{max}} = C_1 \cdot V_1$$

$$x_{\text{max}} = 1,0 \times 10^{-2} \times 100,0 \times 10^{-3} = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

5 $[\text{H}_3\text{O}^+]_f = 10^{-\text{pH}_1} = 10^{-3,4} = 4,0 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

6 $x_f = [\text{H}_3\text{O}^+]_f \cdot V_1 = 4,0 \times 10^{-4} \times 100,0 \times 10^{-3}$

$$x_f = 4,0 \times 10^{-5} \text{ mol}$$

7 $x_f < x_{\text{max}}$: l'avancement maximal n'est pas atteint.

8 pH de la solution S_2 : pH = 2,0. Voir le tableau ci-dessous.

Tableau de la question 3 :

Équation	$\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}(\text{aq})$	+	$\text{H}_2\text{O}(\ell)$	\rightleftharpoons	$\text{CH}_3\text{CO}_2^-(\text{aq})$	+	$\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$
État initial ($x = 0$)	$C_1 \cdot V_1$		Solvant		0		0
État intermédiaire (x)	$C_1 \cdot V_1 - x$		Solvant		x		x
État final ($x_f = 0$)	$C_1 \cdot V_1 - x_f$		Solvant		x_f		x_f

Tableau de la question 8 :

Équation	$\text{HCl}(\text{g})$	+	$\text{H}_2\text{O}(\ell)$	\longrightarrow	$\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$	+	$\text{Cl}^-(\text{aq})$
État initial ($x = 0$)	$C_2 \cdot V_2$		Solvant		0		0
État intermédiaire (x)	$C_2 \cdot V_2 - x$		Solvant		x		x
État final ($x_f = 0$)	$C_2 \cdot V_2 - x_f$		Solvant		x_f		x_f

9 • L'eau étant le solvant de la solution, donc l'espèce en excès, l'avancement maximal sera atteint ($x_f = x_{\max}$) si le chlorure d'hydrogène est totalement consommé :

$$C_2 \cdot V_2 - x_{\max} = 0, \text{ soit } x_{\max} = C_2 \cdot V_2$$

$$x_{\max} = 1,0 \times 10^{-2} \times 100,0 \times 10^{-3} = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

$$\bullet [\text{H}_3\text{O}^+]_f = 10^{-\text{pH}_2} = 10^{-2,0} = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$\bullet x_f = [\text{H}_3\text{O}^+]_f \cdot V_1 = 1,0 \times 10^{-2} \times 100,0 \times 10^{-3}$$

$$x_f = 1,0 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

• $x_f = x_{\max}$: l'avancement maximal est atteint.

10 La réaction entre le chlorure d'hydrogène et l'eau est totale, car $x_f = x_{\max}$.

La réaction entre l'acide éthanoïque et l'eau n'est pas totale, car $x_f < x_{\max}$.

B Notion d'équilibre ; sens d'évolution d'un système chimique

Compléments

pH de la solution S_1 seule : $\text{pH}_1 = 3,4$.

Bécher 1 : pH de la solution S_1 + quelques gouttes d'acide éthanoïque pur : $\text{pH}_1 = 4,2$.

Bécher 2 : pH de la solution S_1 + éthanoate de sodium solide : $\text{pH}_2 = 2,4$.

11 a. Dans le bécher 1, le pH augmente (de 3,4 à 4,2). La concentration $[\text{H}_3\text{O}^+]$ diminue (de $4,0 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ à $6,3 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$).

b. Le volume de la solution n'ayant pas varié, la quantité $n(\text{H}_3\text{O}^+)$ diminue : le système chimique a évolué dans le **sens inverse** \leftarrow .

12 Dans le bécher 2, le pH diminue (de 3,4 à 2,4).

La concentration $[\text{H}_3\text{O}^+]$ augmente (de $4,0 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ à $4,0 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$).

Le volume de la solution n'ayant pas varié, la quantité $n(\text{H}_3\text{O}^+)$ augmente : le système chimique a évolué dans le **sens direct** \rightarrow .

13 Lorsqu'on ajoute une espèce chimique intervenant dans l'équation de la réaction, un système chimique évolue dans le sens qui tend à consommer l'espèce apportée.

2 Réaction entre un acide fort et une base forte (p. 325)

Matériel et produits

Paillasse professeur

- 2,0 L de solution d'acide chlorhydrique à la concentration $C = 1,0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- 2,0 L de solution d'hydroxyde de sodium à la concentration $C = 1,0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Paillasse élève

- Deux béchers de 250 mL ;
- deux éprouvettes graduées de 100 mL ;
- un agitateur magnétique et un barreau aimanté ;
- un thermomètre ;
- une fiole jaugée de 100,0 mL ;
- une pipette jaugée de 10,0 mL ;
- un compte-gouttes ;
- de l'eau distillée.

Expérience 1 : acide et base à $1,0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	$\theta_i = 20,4 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_f = 26,8 \text{ }^\circ\text{C}$
Expérience 2 : acide et base à $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	$\theta_i = 20,4 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_f = 21,1 \text{ }^\circ\text{C}$

1 Pour les deux expériences, $\theta_f > \theta_i$.

2 Lors de la réaction étudiée, le système chimique cède de l'énergie thermique au milieu extérieur.

3 Pour un même volume réactionnel, l'énergie thermique est d'autant plus grande que les concentrations sont élevées.

$$\bullet \mathcal{E}_{\text{th}} = m \cdot c \cdot (\theta_f - \theta_i) = (100 + 100) \times 4,18 \times (26,8 - 20,4)$$

$$\mathcal{E}_{\text{th}} = 5,35 \times 10^3 \text{ J} = 5,35 \text{ kJ}$$

5 Les quantités d'acide et de base sont égales à :
 $1,0 \times 100 \times 10^{-3} = 1,0 \times 10^{-1} \text{ mol.}$

6 Le mélange étant stœchiométrique :
 $x_{\max} = 1,0 \times 10^{-1} \text{ mol.}$

7 Pour $1,0 \times 10^{-1} \text{ mol}$, $\mathcal{E}_{\text{th}} = 5,35 \text{ kJ}$.
Donc, pour $1,0 \text{ mol}$ on aura $\mathcal{E}_{\text{th}} = 53,5 \text{ kJ}$,
soit : $\mathcal{E}_{\text{th}} = 53,5 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$.

8 Incertitude relative : $\left| \frac{57 - 53,5}{57} \right| = 6,1 \text{ \%}$.

3 Intérêt du contrôle du pH dans un milieu biologique (p. 326-327)

1 Le *métabolisme* est l'ensemble des transformations chimiques qui se déroulent dans les cellules vivantes et qui permettent, à la fois, la dégradation de certaines molécules et la synthèse de nouvelles molécules.

Le *catabolisme* est uniquement l'ensemble des transformations permettant la dégradation des molécules. On parle donc de métabolisme pour le glucose, car celui-ci est dégradé par les cellules (catabolisme), mais aussi produit par le foie (métabolisme).

2 Les différents sucs digestifs sont :

- la *salive* dont le pH varie entre 6,5 et 7,4. Or, à 37 °C, le pH d'une solution neutre est $pH_{\text{neutre}} = 6,8$. La salive est donc une solution neutre ou très voisine de la neutralité;
- le *suc gastrique*, qui est un liquide biologique très acide puisque son pH est voisin ou inférieur à 2;
- le *suc pancréatique*, qui a un pH compris entre 7,5 et 8,2. C'est donc un liquide biologique basique;
- le *suc intestinal*, qui a un pH compris entre 7,4 et 7,8. Il est donc, lui aussi, basique.

On peut ajouter la *bile*, dont le rôle n'est pas de transformer les aliments en petites molécules susceptibles de passer dans le sang, mais d'émulsionner les graisses de sorte que leur digestion par le pancréas et l'intestin soit facilitée.

3 Une « solution tampon » est une solution dont le pH varie peu par ajout d'un volume modéré de solution acide, de solution basique ou d'eau.

4 Les transformations biochimiques qui se déroulent dans les organismes vivants ne se font de façon optimale que pour un domaine de pH très étroit. Il est donc nécessaire que le pH des liquides biologiques soit « tamponné », c'est-à-dire ne varie que très peu au cours des transformations chimiques qui s'y déroulent.

5 Le sang veineux revient vers les poumons après être passé dans les organes où il s'est chargé en dioxyde de carbone dissous produit par l'activité cellulaire. Il est donc plus acide que le sang artériel, riche, lui, en dioxygène dissous.

6 a. On a la relation $pH = pK_A + \log \frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}}}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}}}$.

Or, le pK_A du couple est égal à 6,1 à 37 °C.

On a donc :

$$\frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}}}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}}} = 10^{(pH - pK_A)} = 10^{(7,4 - 6,1)} = 10^{1,3} \approx 20.$$

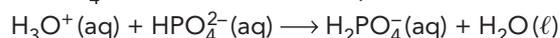
b. L'espèce chimique du « tampon bicarbonate » qui prédomine dans le sang est l'ion hydrogénéocarbonate HCO_3^- .

7 a. On peut écrire : $pH = pK_A + \log \frac{[\text{HPO}_4^{2-}]_{\text{éq}}}{[\text{H}_2\text{PO}_4^-]_{\text{éq}}}$.

b. Le pH initial de la solution est égal au pK_A du couple, puisque les deux concentrations sont égales.

Donc : $pH_i = pK_A = 6,9$.

c. Une réaction enzymatique produit $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ d'ions oxonium qui réagissent totalement avec les ions HPO_4^{2-} selon la réaction d'équation :



La réaction conduit ainsi à la disparition de $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ d'ions hydrogénéophosphate, donc : $[\text{HPO}_4^{2-}] = 60 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Cette réaction produit aussi $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ d'ions dihydrogénéophosphate, donc :

$$[\text{H}_2\text{PO}_4^-] = 100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

La relation donnée à la question 7a permet d'écrire :

$$pH = 6,9 + \log \left(\frac{60}{100} \right) = 6,9 - 0,2 = 6,7.$$

Alors que la variation des concentrations des ions est de 25 %, la variation du pH de la solution n'est que 0,2 unité, d'où le nom de « tampon phosphate » donné au couple.

8 a. Dans l'eau de Vichy, l'espèce chimique majoritairement présente est l'ion hydrogénéocarbonate.

b. L'équation de la réaction montre que, si la concentration en ions hydrogénéocarbonate augmente, l'équilibre de la réaction va se déplacer vers la droite, dans le sens direct, de façon à favoriser la disparition de cet ion et donc, simultanément, la disparition de l'acide urique solide. Par conséquent, une consommation importante d'eau de Vichy aide à la dissolution des calculs d'acide urique.

4 Détermination d'une constante d'acidité K_A (p. 328)

Matériel et produits

Paillasse professeur

1,0 L de solution d'acide méthanoïque à la concentration $C = 5,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Paillasse élève

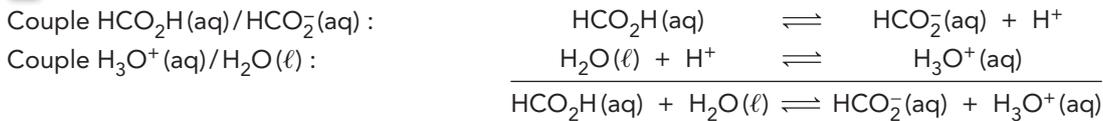
- Deux béchers de 150 mL;
- une éprouvette graduée de 100 mL;
- un conductimètre avec une sonde conductimétrique;

- un thermomètre;
- une fiole jaugée de 100,0 mL;
- une pipette jaugée de 10,0 mL;
- un compte-gouttes;
- une solution étalon pour le conductimètre;
- de l'eau distillée.

A Détermination de concentrations d'ions par conductimétrie

1 $\sigma = 1095 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1} = 1095 \times 10^{-6} \text{S} \cdot \text{cm}^{-1} = 1095 \times 10^{-6} \times 10^2 \text{S} \cdot \text{m}^{-1} = 1095 \times 10^{-4} \text{S} \cdot \text{m}^{-1}$
 $\sigma = 1,095 \times 10^{-1} \text{S} \cdot \text{m}^{-1}$

2 Réaction entre l'acide méthanoïque et l'eau :



3 Tableau d'avancement :

Équation	$\text{HCO}_2\text{H}(\text{aq})$	+	$\text{H}_2\text{O}(\ell)$	\rightleftharpoons	$\text{HCO}_2^-(\text{aq})$	+	$\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$
État initial ($x = 0$)	$n_0 = C \cdot V$		Solvant		0		0
État intermédiaire (x)	$n_0 - x$		Solvant		x		x
État final ($x_f = 0$)	$n_0 - x_f$		Solvant		x_f		x_f

4 a. Dans l'état final d'équilibre :

$$x_f = n(\text{HCO}_2^-)_{\text{éq}} = n(\text{H}_3\text{O}^+)_{\text{éq}}$$

b. La relation précédente s'écrit aussi :

$$[\text{HCO}_2^-]_{\text{éq}} \cdot V = [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} \cdot V, \text{ donc } [\text{HCO}_2^-]_{\text{éq}} = [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}$$

5 $\sigma = \lambda(\text{HCO}_2^-) \cdot [\text{HCO}_2^-]_{\text{éq}} + \lambda(\text{H}_3\text{O}^+) \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}$
 $= \lambda_1 \cdot [\text{HCO}_2^-]_{\text{éq}} + \lambda_2 \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}$

6 a. Comme $[\text{HCO}_2^-]_{\text{éq}} = [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}$:

$$\sigma = (\lambda_1 + \lambda_2) \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}$$

soit : $[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} = \frac{\sigma}{\lambda_1 + \lambda_2}$

Comme σ est en $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ et λ en $\text{S} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$, $[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}$ s'exprime en $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$.

b. $[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} = \frac{1,095 \times 10^{-1}}{5,46 \times 10^{-3} + 35,0 \times 10^{-3}} = 2,71 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$
 $= 2,71 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

c. $[\text{HCO}_2^-]_{\text{éq}} = [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} = 2,71 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

B Constante d'acidité K_A du couple $\text{HCO}_2\text{H}(\text{aq})/\text{HCO}_2^-(\text{aq})$

7 $K_A = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} \cdot [\text{HCO}_2^-]_{\text{éq}}}{[\text{HCO}_2\text{H}]_{\text{éq}}}$

8 a. $n(\text{HCO}_2\text{H})_{\text{éq}} = n_0 - x_f = n_0 - n(\text{H}_3\text{O}^+)_{\text{éq}}$

b. La relation précédente s'écrit aussi :

$$[\text{HCO}_2\text{H}]_{\text{éq}} \cdot V = C \cdot V - [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} \cdot V$$

soit, en divisant par V :

$$[\text{HCO}_2\text{H}]_{\text{éq}} = C - [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}$$

9 $K_A = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} \cdot [\text{HCO}_2^-]_{\text{éq}}}{[\text{HCO}_2\text{H}]_{\text{éq}}} = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}^2}{C - [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}}$

10 $K_A = \frac{(2,71 \times 10^{-3})^2}{5,0 \times 10^{-2} - 2,71 \times 10^{-3}} = 1,55 \times 10^{-4}$
 $\approx 1,6 \times 10^{-4}$

11 a. Les huit groupes d'élèves ont trouvé pour K_A :
 $1,55 \times 10^{-4}$; $1,57 \times 10^{-4}$; $4,19 \times 10^{-3}$; $1,51 \times 10^{-4}$;
 $1,56 \times 10^{-4}$; $1,60 \times 10^{-4}$; $1,56 \times 10^{-4}$; $1,53 \times 10^{-4}$.

La troisième valeur étant manifestement fautive, la valeur moyenne des sept autres valeurs est :

$$K_{A\text{moy}} = 1,55 \times 10^{-4}$$

b. L'écart type de la série de mesures est :

$$2,87 \times 10^{-6} \approx 2,9 \times 10^{-6}$$

Avec une incertitude de répétabilité de 99 %, un nombre de mesures $n = 7$ et un coefficient de Student égal à 3,71, il vient :

$$U(K_A) = 3,71 \times \frac{2,9 \times 10^{-6}}{\sqrt{7}} = 4,1 \times 10^{-6}$$

Ainsi : $K_A = 1,55 \times 10^{-4} \pm 4,1 \times 10^{-6}$.

c. D'après le résultat précédent, l'intervalle de confiance est $1,509 \times 10^{-4} < K_A < 1,591 \times 10^{-4}$.

On retient : $1,51 \times 10^{-4} < K_A < 1,59 \times 10^{-4}$.

La valeur donnée dans les tables, $K_A = 1,58 \times 10^{-4}$, appartient bien à l'intervalle de confiance déterminé expérimentalement.

12 En diluant dix fois la solution S, on obtient une solution S' telle que $\sigma' = 3,28 \times 10^{-2} \text{S} \cdot \text{m}^{-1}$.

$$[\text{HCO}_2^-]_{\text{éq}}' = [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}' = \frac{3,28 \times 10^{-2}}{5,46 \times 10^{-3} + 35,0 \times 10^{-3}}$$

$$= 8,11 \times 10^{-4}$$

$$K_A = \frac{(8,11 \times 10^{-4})^2}{5,0 \times 10^{-3} - 8,11 \times 10^{-3}} = 1,57 \times 10^{-4}$$

On trouve une valeur appartenant à l'intervalle de confiance précédent.

13 Pour un couple acide/base donné, la constante d'acidité K_A du couple ne dépend pas de l'état initial du système chimique étudié.

Exercices (p. 337-347)

QCM

1. A et C; 2. A et C; 3. 1. B; 4. 1. A et C; 2. B.;
5. 1. B; 2. A; 3. A, B et C; 4. 1. C; 2. A et B.

Application immédiate

6 Montrer qu'un acide est faible dans l'eau

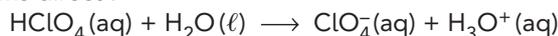
1. Quantité n_a d'acide perchlorique dissous :
 $n_a = C_a \cdot V_a = 7,94 \times 10^{-3} \times 20,0 \times 10^{-3}$
 $= 1,59 \times 10^{-4} \text{ mol} = 0,159 \text{ mmol}$.

$x_f = [\text{H}_3\text{O}^+]_f \cdot V_a$ et $[\text{H}_3\text{O}^+]_f = 10^{-\text{pH}}$
 soit : $x_f = 10^{-\text{pH}} \cdot V_a = 10^{-2,1} \times 20,0 \cdot 10^{-3}$
 $x_f = 1,6 \times 10^{-4} \text{ mol} = 0,16 \text{ mmol}$.

2. L'avancement maximal est atteint lorsque le réactif limitant, l'acide perchlorique, est entièrement consommé. On en déduit :

$$0,159 - x_{\text{max}} = 0, \quad \text{soit } x_{\text{max}} = 0,159 \text{ mmol}.$$

Comme $x_f = x_{\text{max}}$ la réaction entre l'acide perchlorique et l'eau est totale. L'acide perchlorique est donc un acide fort dans l'eau. L'écriture de l'équation de la réaction s'écrit avec une flèche simple dans le sens direct :



7 Identifier une espèce prédominante

1. $\text{C}_6\text{H}_5\text{CO}_2^-(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\ell) \rightleftharpoons \text{C}_6\text{H}_5\text{CO}_2\text{H}(\text{aq}) + \text{HO}^-(\text{aq})$

$$2. K_A = \frac{[\text{C}_6\text{H}_5\text{CO}_2^-(\text{aq})]_{\text{éq}} \cdot [\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})]_{\text{éq}}}{[\text{C}_6\text{H}_5\text{CO}_2\text{H}(\text{aq})]_{\text{éq}}} = 10^{-\text{p}K_A}$$

donc : $K_A = 10^{-4,2} = 6,3 \times 10^{-5}$.

3. a. Comme $\text{pH} < \text{p}K_A$ l'espèce prédominante dans la solution S est l'acide benzoïque $\text{C}_6\text{H}_5\text{CO}_2\text{H}(\text{aq})$.

$$b. \frac{[\text{C}_6\text{H}_5\text{CO}_2^-(\text{aq})]_{\text{éq}}}{[\text{C}_6\text{H}_5\text{CO}_2\text{H}(\text{aq})]_{\text{éq}}} = \frac{10^{-\text{p}K_A}}{[\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})]_{\text{éq}}} = \frac{10^{-\text{p}K_A}}{10^{-\text{pH}}}$$

$$\text{soit : } \frac{[\text{C}_6\text{H}_5\text{CO}_2^-(\text{aq})]_{\text{éq}}}{[\text{C}_6\text{H}_5\text{CO}_2\text{H}(\text{aq})]_{\text{éq}}} = \frac{10^{-4,2}}{10^{-3,6}} = 2,5 \times 10^{-1} < 1.$$

L'espèce prédominante dans la solution S est $\text{C}_6\text{H}_5\text{CO}_2\text{H}(\text{aq})$.

Pour commencer

8 Utiliser la définition du pH

1. $\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}$ et $[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} = 10^{-\text{pH}}$

2.

Solution	A	B	C	D
$[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}$ (mol·L ⁻¹)	$1,0 \times 10^{-3}$	$4,0 \times 10^{-4}$	$4,8 \times 10^{-5}$	$1,6 \times 10^{-10}$
pH	3,0	3,4	4,3	9,8

3. La concentration $[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}$ diminue lorsque le pH augmente.

9 Associer pH et concentration $[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}$

Plus le pH est grand, plus la concentration $[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}$ est petite. Donc :

– pour la solution A :

$$\text{pH}_A = 3,2 ; \quad [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} = 6,3 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} ;$$

– pour la solution B :

$$\text{pH}_B = 5,6 ; \quad [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} = 2,5 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} ;$$

– pour la solution C :

$$\text{pH}_C = 8,3 ; \quad [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} = 5,0 \times 10^{-9} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

10 Étudier un équilibre chimique

1. Quantité n_0 d'acide méthanoïque dissous :

$$n_0 = C \cdot V = 1,0 \times 10^{-3} \times 50,0 \times 10^{-3}$$

$$= 5,0 \times 10^{-5} \text{ mol} = 50 \text{ } \mu\text{mol}.$$

Voir le tableau d'avancement, en μmol , en fin de chapitre, p. 143.

2. L'eau étant le solvant, le réactif limitant, l'acide méthanoïque, est entièrement consommé :

$$50 - x_{\text{max}} = 0, \quad \text{soit } x_{\text{max}} = 50 \text{ } \mu\text{mol}.$$

3. $x_f = [\text{H}_3\text{O}^+]_f \cdot V_a$ et $[\text{H}_3\text{O}^+]_f = 10^{-\text{pH}}$, donc :

$$x_f = 10^{-\text{pH}} \cdot V_a = 10^{-3,5} \times 50,0 \times 10^{-3}$$

$$x_f = 1,6 \times 10^{-5} \text{ mol} = 16 \text{ } \mu\text{mol}.$$

4. Comme $x_f < x_{\text{max}}$ la réaction entre l'acide méthanoïque et l'eau est limitée et conduit à un équilibre. L'acide méthanoïque est donc un acide faible dans l'eau.

11 Montrer qu'une réaction est totale

1. La quantité n_0 d'acide bromhydrique dissous est :

$$n_0 = C \cdot V = 2,51 \times 10^{-3} \times 50,0 \times 10^{-3}$$

$$= 1,26 \times 10^{-4} \text{ mol} = 0,126 \text{ mmol}.$$

L'eau, en tant que solvant, est l'espèce chimique en excès. Le tableau d'avancement, en mmol, s'écrit :

voir le tableau d'avancement, en mmol, en fin de chapitre, p. 143.

2. L'avancement maximal est atteint si le réactif limitant, l'acide bromhydrique, est entièrement consommé. On en déduit :

$$0,126 - x_{\text{max}} = 0, \quad \text{soit } x_{\text{max}} = 0,126 \text{ mmol}.$$

Les réactions acido-basiques sont instantanées : l'avancement final x_f est déjà atteint lorsqu'on mesure le pH de la solution. On a :

$$x_f = [\text{H}_3\text{O}^+]_f \cdot V \quad \text{et} \quad [\text{H}_3\text{O}^+]_f = 10^{-\text{pH}}$$

$$\text{donc : } x_f = 10^{-\text{pH}} \cdot V = 10^{-2,6} \times 50,0 \times 10^{-3}$$

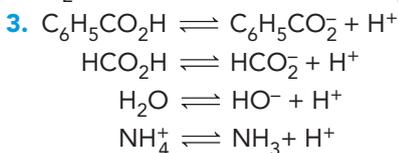
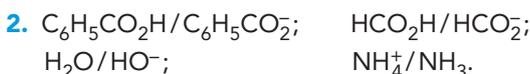
$$x_f = 1,3 \times 10^{-4} \text{ mol} = 0,13 \text{ mmol}.$$

3. Comme $x_f = x_{\text{max}}$ (au nombre de chiffres significatifs près), la réaction entre l'acide bromhydrique et l'eau est totale. L'acide bromhydrique est donc un acide fort dans l'eau. L'écriture de l'équation de la réaction se fait bien avec une flèche dans le sens direct.

12 Rechercher des couples acide/base

1. Un acide est une espèce chimique capable de céder au moins un proton H^+ .

Une base est une espèce chimique capable de capter au moins un proton H^+ .



4. a. L'eau appartient aussi au couple H_3O^+/H_2O .

b. Une espèce qui, comme l'eau, est l'acide d'un couple et la base d'un autre couple, est un ampholyte.

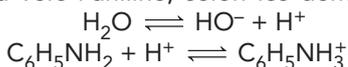
13 Reconnaître deux couples acide/base

1. Les deux couples acide/base associés à la réaction sont :



2. L'équation de la réaction est écrite avec une double flèche. Il s'agit donc d'un équilibre. La réaction de l'aniline avec l'eau n'est pas totale. L'aniline est donc une base faible dans l'eau.

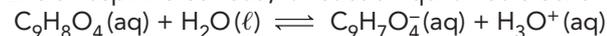
3. La réaction correspond à l'échange d'un proton H^+ de l'eau vers l'aniline, selon les demi-équations suivantes :



14 Étudier des réactions acido-basiques

1. L'aspirine est un acide faible dans l'eau : elle ne réagit donc pas totalement avec l'eau.

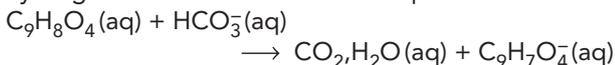
Entre l'aspirine et l'eau, la réaction qui a lieu s'écrit :



2. La dissolution de l'hydrogénocarbonate de sodium $NaHCO_3(s)$, dans l'eau est totale :



3. L'équation de la réaction qui se produit entre l'ion hydrogénocarbonate dissous et l'aspirine est :



4. L'effervescence observée est due au dégagement de CO_2 sous forme de gaz, car sa solubilité dans l'eau est limitée.

15 Utiliser le produit ionique de l'eau

1. Le produit ionique de l'eau est défini par :

$$K_e = [H_3O^+]_f \cdot [HO^-]_f$$

2. $pK_e = -\log K_e = -\log(2,4 \times 10^{-14}) = 13,6$

3. Le pH d'une solution neutre à la température de $37^\circ C$ serait de :

$$pH = \frac{pK_e}{2} = 6,8.$$

4. À cette température, la salive est très légèrement basique, car son pH est supérieur à pK_e .

16 Vérifier que l'autoprotolyse de l'eau est une réaction très limitée

1. Voir le tableau d'avancement, en mol, en fin de chapitre, p. 143.

$$2. n_0 = \frac{m_{eau}}{M_{eau}} = \frac{\mu_{eau} \cdot V_{eau}}{M_{eau}} = \frac{1000 \times 1,0}{18,0}$$

$$n_0 = 56 \text{ mol}$$

3. L'avancement maximal est atteint si l'eau est entièrement consommée :

$$56 - 2 x_{\max} = 0, \text{ soit } x_{\max} = \frac{56}{2} = 28 \text{ mol.}$$

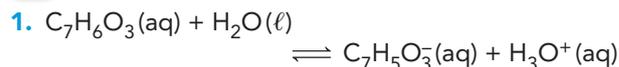
$$4. [H_3O^+]_f = 10^{-pH} = 1,0 \times 10^{-7} \text{ mol} \cdot L^{-1},$$

$$\text{d'où } x_f = n_f(H_3O^+) = [H_3O^+]_f \cdot V$$

$$x_f = 1,0 \times 10^{-7} \times 1,0 = 1,0 \times 10^{-7} \text{ mol.}$$

5. $x_f < x_{\max}$: la réaction d'autoprotolyse de l'eau est très limitée et conduit à un équilibre.

17 Calculer une constante d'acidité



$$2. K_A = \frac{[C_7H_5O_3^-]_{\text{éq}} \cdot [H_3O^+]_{\text{éq}}}{[C_7H_6O_3]_{\text{éq}}}$$

$$3. K_A = \frac{1,8 \times 10^{-3} \times 1,8 \times 10^{-3}}{3,2 \times 10^{-3}} = 1,0 \times 10^{-3}$$

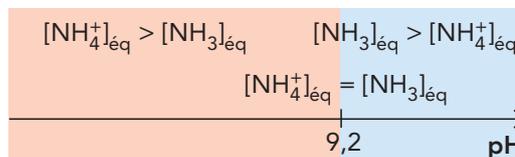
$$4. pK_A = -\log K_A = -\log(1,0 \times 10^{-3}) = 3,0$$

18 Tracer un diagramme de prédominance

1. $pK_A = -\log K_A = -\log(6,3 \times 10^{-10})$

$$pK_A = 9,2$$

2. Diagramme de prédominance du couple NH_4^+/NH_3 :



3. a. Si le pH vaut 10,6, c'est l'espèce basique qui prédomine, c'est-à-dire l'ammoniac NH_3 .

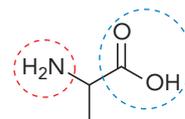
b. De l'expression de K_A , on déduit :

$$\frac{[NH_3]_{\text{éq}}}{[NH_4^+]_{\text{éq}}} = \frac{10^{-pK_A}}{10^{-pH}} = 25.$$

c. $[NH_3]_{\text{éq}} > [NH_4^+]_{\text{éq}}$: le résultat est en accord avec la réponse à la question 3a.

19 Établir le diagramme de prédominance d'un acide α -aminé

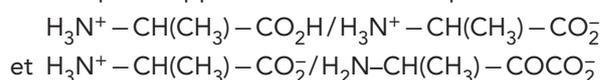
1. L'alanine porte un groupe **carboxyle** et un groupe **amine** :



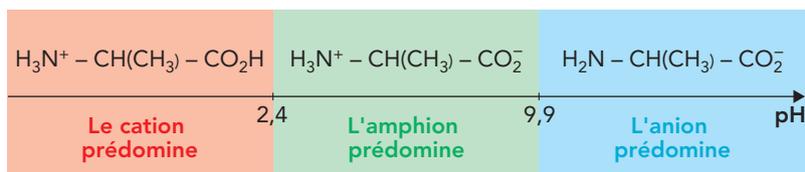
2. L'amphion formé a pour formule : $H_3N^+-CH(CH_3)-COO^-$

qui peut se noter $H_3N^+ - CH(CH_3) - CO_2^-$

3. L'amphion appartient aux deux couples :



4. Le diagramme de prédominance de l'alanine est :



20 Calculer le pH d'une solution d'acide fort

1. Un acide fort dans l'eau est un acide qui réagit totalement avec l'eau.



3. Comme l'acide nitrique réagit totalement avec l'eau, à l'état final, on a :

$$[\text{H}_3\text{O}^+]_f = C = 2,5 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$\text{On en déduit : } \text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+]_f = -\log C \\ = -\log(2,5 \times 10^{-3}) = 2,6$$

4. On dilue dix fois la solution S,

$$\text{donc : } [\text{H}_3\text{O}^+]'_f = 2,5 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} ;$$

$$\text{d'où : } \text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+]'_f = -\log(2,5 \times 10^{-4}) = 3,6$$

21 Calculer le pH d'une solution de base forte

1. La dissolution de l'hydroxyde de sodium étant totale, l'équation de la réaction de dissolution s'écrit :



2. La stœchiométrie de la réaction indique qu'à l'état final on a :

$$[\text{HO}^-]_f = C = 5,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

Le pH de la solution de base forte est alors :

$$\text{pH} = 14 + \log C = 14 + \log(5,0 \times 10^{-2}) = 12,7$$

3. Si on dilue dix fois la solution S, on aura, dans la solution S' :

$$[\text{HO}^-]'_f = C = 5,0 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

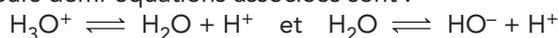
d'où :

$$\text{pH} = 14 + \log C = 14 + \log(5,0 \times 10^{-3}) = 11,7$$

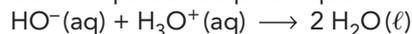
22 Établir l'équation de la réaction entre un acide fort et une base forte

1. Les deux couples de l'eau sont $\text{H}_3\text{O}^+/\text{H}_2\text{O}$ et $\text{H}_2\text{O}/\text{HO}^-$.

Leurs demi-équations associées sont :



2. Entre la solution d'acide fort et la solution de base forte, la réaction qui a lieu a pour équation :



3. La réaction entre un acide fort et une base forte libère de l'énergie thermique et s'accompagne donc d'une élévation de température.

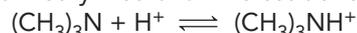
Pour s'entraîner

23 Poisson au court-bouillon

1. La N,N-diméthylméthanamine réagit avec l'acide éthanoïque qui est un acide.

Donc la N,N-diméthylméthanamine est une base.

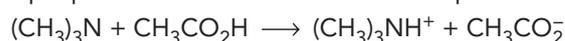
La demi-équation acido-basique associée au couple de la N,N-diméthylméthanamine est donc :



2. La demi-équation associée à l'acide éthanoïque est :



3. On ajoute le vinaigre contenant de l'acide éthanoïque pour réaliser la réaction dont l'équation est :



On obtient ainsi une espèce chimique soluble qui n'est donc plus volatile, ce qui évite les mauvaises odeurs.

24 Mesure d'un pH et incertitudes

1. a. Avant de mesurer le pH de la solution, on doit procéder à l'étalonnage du pH-mètre.

b. Pour réaliser cet étalonnage, on utilise des solutions étalon (solutions tampons).

2. Résultat : $\text{pH}_{\text{solution}} = 2,52 \pm 0,05$.

3. On a $2,47 \leq \text{pH}_{\text{solution}} \leq 2,57$,

$$\text{ce qui donne : } 10^{-2,47} \geq [\text{H}_3\text{O}^+]_f \geq 10^{-2,57}$$

soit :

$$2,69 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \leq [\text{H}_3\text{O}^+]_f \leq 3,39 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

ce qui peut s'écrire :

$$[\text{H}_3\text{O}^+]_f = 3,04 \pm 0,35 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

4. L'incertitude relative sur la valeur de la concentration en ion oxonium vaut :

$$\frac{U([\text{H}_3\text{O}^+])}{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{solution}}} = \frac{0,35}{3,04} = 0,115,$$

soit une incertitude relative de 11,5 %.

5. Une valeur de concentration $[\text{H}_3\text{O}^+]_f$ déduite d'une valeur de pH ne doit pas s'exprimer avec plus de deux chiffres significatifs, car l'incertitude relative sur la valeur de pH est de l'ordre de 10 %.

Cette incertitude se répercute sur la valeur de la concentration.

Dans le cas de l'exercice, on gardera donc la valeur :

$$[\text{H}_3\text{O}^+]_f = 3,0 \pm 0,4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

25 À chacun son rythme

1. a. Voir le tableau d'avancement en fin de chapitre, p. 143.

$$\text{b. } \frac{x_{\text{éq}}}{V} = [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} = [\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_2^-]_{\text{éq}}$$

$$\text{c. } \sigma = \lambda_1 \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} + \lambda_2 \cdot [\text{CH}_3\text{CO}_2^-]_{\text{éq}} \\ = (\lambda_1 + \lambda_2) \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}$$

$$\text{d. } [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} = \frac{\sigma}{\lambda_1 + \lambda_2} = 1,61 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} = 1,61 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$\text{2. a. } K_A = \frac{[\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_2^-]_{\text{éq}} \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}}{[\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2]_{\text{éq}}}$$

$$b. n_{\text{éq}}(\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2) = [\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2]_{\text{éq}} \cdot V = C \cdot V - x_{\text{éq}}$$

$$n_{\text{éq}}(\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2) = C \cdot V - [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} \cdot V$$

$$d'o\grave{u} : [\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2]_{\text{éq}} = C - [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}$$

$$c. K_A = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}^2}{C - [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}}$$

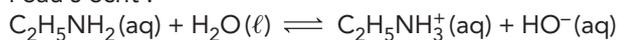
$$K_A = \frac{(1,61 \times 10^{-4})^2}{2,0 \times 10^{-3} - 1,61 \times 10^{-4}} = 1,41 \times 10^{-5}$$

26 Solution aqueuse d'éthanamine

1. La réaction de l'éthanamine avec l'eau conduit à un équilibre.

Les couples mis en jeu sont :

$\text{C}_2\text{H}_5\text{NH}_3^+(\text{aq})/\text{C}_2\text{H}_5\text{NH}_2(\text{aq})$ et $\text{H}_2\text{O}(\ell)/\text{HO}^-(\text{aq})$, donc l'équation de la réaction entre l'éthanamine et l'eau s'écrit :



2. $\text{pH} = 11,3$, donc :

$$[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} = 10^{-\text{pH}} = 10^{-11,3} = 5,0 \times 10^{-12} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ (on garde deux chiffres significatifs).}$$

3. On en déduit :

$$[\text{HO}^-]_{\text{éq}} = \frac{K_e}{[\text{H}_3\text{O}^+]} = \frac{10^{-14}}{5,0 \times 10^{-12}} = 2,0 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

4. Voir le tableau d'avancement en fin de chapitre, p. 144.

L'avancement maximal serait atteint si on avait, à l'état final :

$$C \cdot V - x_{\text{max}} = 0, \text{ soit } x_{\text{max}} = C \cdot V$$

$$\text{On en déduit que } \tau = \frac{x_f}{x_{\text{max}}} = \frac{[\text{HO}^-]_{\text{éq}} \cdot V}{C \cdot V} = \frac{[\text{HO}^-]_{\text{éq}}}{C}$$

$$5. \tau = \frac{2,0 \times 10^{-3}}{1,0 \times 10^{-2}} = 0,20.$$

On en conclut que l'avancement final ne représente que 20 % de l'avancement maximal. La réaction est bien limitée et conduit à un équilibre.

6. a. Si l'éthanamine était une base forte dans l'eau, τ aurait eu la valeur 1 (soit $x_f = x_{\text{max}}$, réaction totale).

b. Le pH de la solution serait alors égal à :

$$\text{pH} = \text{p}K_e + \log C = 14 - 2 = 12.$$

Pour aller plus loin

27 Diagramme de distribution d'un indicateur coloré

1. En milieu très acide, c'est la forme acide du couple HInd/Ind^- qui prédomine.

La courbe qui débute à $\text{pH} = 0$ à la valeur 100 % est celle qui correspond à la forme acide HInd .

L'autre courbe correspond à la forme basique Ind^- .

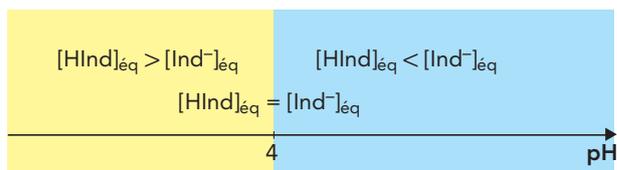
2. On a la relation $\text{pH} = \text{p}K_A + \log \frac{[\text{Ind}^-]_{\text{éq}}}{[\text{HInd}]_{\text{éq}}}$, donc

lorsque $\text{pH} = \text{p}K_A$ aucune des deux espèces ne prédomine; on a, dans la solution, $[\text{HInd}]_{\text{éq}} = [\text{Ind}^-]_{\text{éq}}$.

Sur le graphe, cela correspond au croisement des deux courbes : on a 50 % de chacune des espèces.

Au point de croisement, on a $\text{pH} = \text{p}K_A$, donc $\text{p}K_A = 4$ pour le couple HInd/Ind^- .

3. Le diagramme de prédominance du couple HInd/Ind^- est donc :



4. Dans une solution dont le pH prend la valeur 2, l'indicateur coloré prend une teinte jaune.

À $\text{pH} = 4$, il prend une teinte verte et à $\text{pH} = 9$ une teinte bleue.

$$5. P(\text{HInd}) = \frac{[\text{HInd}]_{\text{éq}}}{[\text{HInd}]_{\text{éq}} + [\text{Ind}^-]_{\text{éq}}} = \frac{[\text{HInd}]_{\text{éq}}}{C}$$

$$P(\text{Ind}^-) = \frac{[\text{Ind}^-]_{\text{éq}}}{[\text{HInd}]_{\text{éq}} + [\text{Ind}^-]_{\text{éq}}} = \frac{[\text{Ind}^-]_{\text{éq}}}{C}$$

6. Au $\text{pH} = 3,5$, on lit sur le graphe :

$$P(\text{HInd}) = 75 \% = 0,75 \text{ et } P(\text{Ind}^-) = 25 \% = 0,25$$

ce qui conduit à :

$$[\text{HInd}]_{\text{éq}} = P(\text{HInd}) \cdot C = 0,75 \times 20 = 15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$\text{et } [\text{Ind}^-]_{\text{éq}} = P(\text{Ind}^-) \cdot C = 0,25 \times 20 = 5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

$$7. \frac{[\text{Ind}^-]_{\text{éq}}}{[\text{HInd}]_{\text{éq}}} = \frac{P(\text{Ind}^-)}{P(\text{HInd})} = 10 \quad (1)$$

$$P(\text{HInd}) + P(\text{Ind}^-) = 1 \quad (2)$$

$$(1) \rightarrow P(\text{Ind}^-) = 10 \times P(\text{HInd})$$

$$\text{donc } (2) \rightarrow P(\text{HInd}) + 10 \times P(\text{HInd}) = 1,$$

$$\text{soit } P(\text{HInd}) = \frac{1}{11} = 0,09 \text{ et, par conséquent :}$$

$$P(\text{Ind}^-) = 0,91.$$

La limite entre la teinte sensible (verte) et la teinte basique (bleue) se situe lorsque $P(\text{Ind}^-) = 0,91$ et $P(\text{HInd}) = 0,09$.

Sur le graphe, cela correspond à $\text{pH} = 5$.

Par un raisonnement analogue (en remplaçant 10 par 0,1 dans (1)), on aboutit à déterminer que la limite entre la teinte acide (jaune) et la teinte sensible (verte) se situe lorsque :

$$P(\text{Ind}^-) = 0,09 \text{ et } P(\text{HInd}) = 0,91.$$

Sur le graphe, cela correspond à $\text{pH} = 3$.

La zone comprise entre $\text{pH} = 3$ et $\text{pH} = 5$ est la zone de virage de l'indicateur coloré.

28 Solution d'acide sulfurique



2. Chaque mole de $\text{H}_2\text{SO}_4(\ell)$ produit deux moles de $\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$, donc :

$$[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} = 2 \cdot C$$

$$3. \text{pH} = -\log(2 \cdot C) = -\log(2 \times 5,0 \times 10^{-2}) = 1,0$$

4. Dans le cas de l'acide chlorhydrique, on a :

$$[\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} = C$$

$$\text{donc : } \text{pH} = -\log(5,0 \times 10^{-2}) = 1,3.$$

Le pH obtenu est supérieur à celui obtenu avec de l'acide sulfurique de même concentration molaire en soluté apporté.

29 Dioxyde de carbone et pH de l'eau de mer

1. Les couples mis en jeu sont $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}/\text{HCO}_3^-$ et $\text{H}_3\text{O}^+/\text{H}_2\text{O}$, donc :



De l'expression de $K_{A_1} = \frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}} \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}}}$, on peut déduire :

$$\text{pH} = \text{p}K_{A_1} + \log \frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}}}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}}}$$

2. Les couples mis en jeu sont $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$ et $\text{H}_3\text{O}^+/\text{H}_2\text{O}$, donc :



De l'expression de $K_{A_2} = \frac{[\text{CO}_3^{2-}]_{\text{éq}} \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}}{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}}}$, on peut déduire :

$$\text{pH} = \text{p}K_{A_2} + \log \frac{[\text{CO}_3^{2-}]_{\text{éq}}}{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}}}$$

3. a. $\text{p}K_{A_1}$ correspond au croisement des deux dernières courbes.

En effet, en ce point, $[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}} = [\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}}$

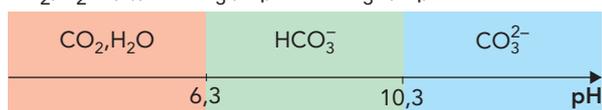
donc : $\text{p}K_{A_1} = 6,3$.

$\text{p}K_{A_2}$ correspond au croisement des deux premières courbes.

En effet, en ce point, $[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}} = [\text{CO}_3^{2-}]_{\text{éq}}$

donc : $\text{p}K_{A_2} = 10,3$.

b. Le diagramme de prédominance des espèces $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}(\ell)$, $\text{HCO}_3^-(\text{aq})$ et $\text{CO}_3^{2-}(\text{aq})$ est :



4. Si le pH diminue, la concentration en ions carbonate CO_3^{2-} va être encore plus faible qu'elle ne l'est déjà à $\text{pH} = 8,2$.

Cette diminution du pH a pour conséquence que la réaction, inverse de celle dont l'équation est écrite en 2, est favorisée. Elle peut entraîner ainsi la dissolution des coquilles de ces organismes.

30 Leucine

Traduction du texte et des questions :

« Un acide α -aminé est une molécule qui contient un groupe fonctionnel amine et un groupe fonctionnel acide carboxylique, le groupe amine étant porté par l'atome de carbone situé immédiatement après l'atome de carbone du groupe acide carboxylique.

Le groupe acide ($-\text{CO}_2\text{H}$) peut perdre un proton pour devenir le groupe négatif carboxylate ($-\text{CO}_2^-$).

Le groupe amine ($-\text{NH}_2$) peut gagner un proton et devenir le groupe positif ammonium ($-\text{NH}_3^+$).

Ainsi, un acide α -aminé existe en solution aqueuse sous la forme d'un amphion. La leucine est l'acide aminé le plus courant dans les protéines humaines.

C'est un acide α -aminé essentiel dont le nom systématique est acide 2-amino-4-méthylpentanoïque. La leucine est utilisée dans le foie, les tissus adipeux et

les tissus musculaires. C'est aussi un additif alimentaire, E 641, utilisé comme exhausteur de goût.

1. @ Qu'est-ce qu'un acide α -aminé essentiel ?

2. Écrire la formule chimique de la leucine.

3. En déduire les formules :

a. de l'amphion de la leucine ;

b. de la forme cationique de la leucine ;

c. de la forme anionique de la leucine.

4. Écrire les deux couples acide/base.

5. Établir le diagramme de prédominance de la leucine.

6. Justifier la présence d'un atome de carbone asymétrique dans la leucine.

7. Représenter les deux stéréoisomères de configuration de la leucine.

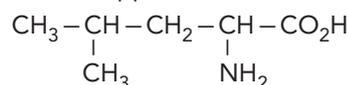
Données :

– cation/amphion $\text{p}K_{A_1} = 2,33$;

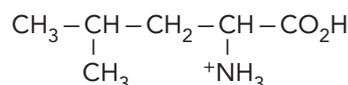
– amphion/anion $\text{p}K_{A_2} = 9,74$. »

1. Un acide α -aminé essentiel est un acide aminé qui ne peut pas être synthétisé par l'organisme humain. Il doit être apporté par l'alimentation.

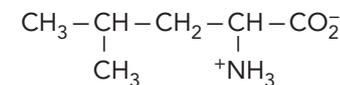
2. La formule développée de la leucine est :



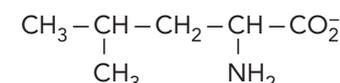
3. Les formes cationique, amphion et anionique de la leucine sont :



a.



b.



c.

4. Les deux couples acide/base sont : cation/amphion et amphion/anion

5. Voir le diagramme de prédominance de la leucine en bas de page.

6. L'atome de carbone n° 2 est un atome de carbone asymétrique dans la leucine, car il a quatre substituants différents.

7. Les deux stéréoisomères de conformation de la leucine sont :

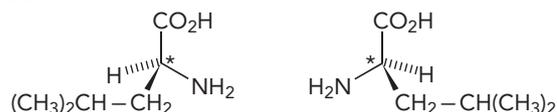
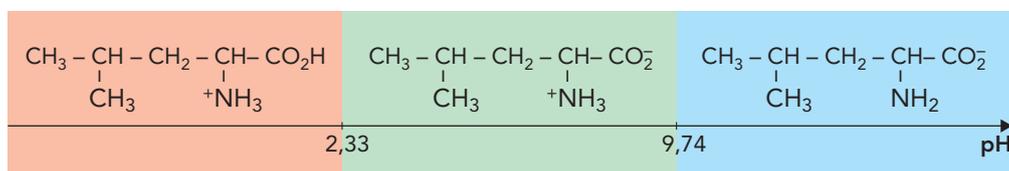


Diagramme de la question 5 :



31 L'eau distillée et son pH

1. L'équation de la réaction d'autoprotolyse de l'eau s'écrit :



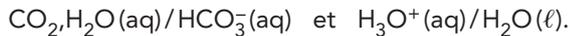
2. Le produit ionique de l'eau est :

$$K_e = [\text{H}_3\text{O}^+]_f \cdot [\text{HO}^-]_f$$

3. À 25 °C, la valeur de K_e est :

$$K_e = 1,0 \times 10^{-7} \times 1,0 \times 10^{-7} = 1,0 \times 10^{-14}$$

4. Les couples acido-basiques mis en jeu dans l'équation de la réaction entre le dioxyde de carbone dissous et l'eau sont :



5. La constante d'acidité K_A associée à la réaction précédente est :

$$K_A = \frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}} \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}}}$$

De l'expression précédente, on déduit :

$$-\log K_A = -\log \frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}} \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}}}$$

$$\text{donc : } -\log K_A = -\log [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} - \log \frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}}}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}}}$$

$$\text{soit : } \text{pH} = \text{p}K_A + \log \frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}}}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}}}$$

6. Si $\text{pH} = 5,7$:

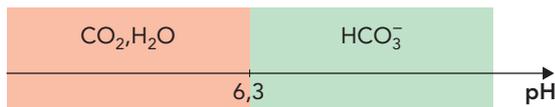
$$\log \frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}}}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}}} = \text{pH} - \text{p}K_A = 5,7 - 6,4 = -0,7$$

$$\log \frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}}}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}}} < 0, \quad \text{donc} \quad \frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}}}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}}} < 1,$$

$$\text{soit : } [\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}} > [\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}}$$

L'espèce prédominante dans cette eau distillée est donc $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}(\text{aq})$.

7. Le diagramme de prédominance des espèces $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}(\text{aq})$ et $\text{HCO}_3^-(\text{aq})$ est :



8. Voir le tableau d'avancement en fin de chapitre, p. 144.

9. La stœchiométrie de la réaction et le tableau d'avancement conduisent à la relation :

$$[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}} = [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}$$

Or, $\text{pH} = 5,7$, d'où :

$$[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}} = [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}} = 10^{-5,7} = 2,0 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

10. De la relation trouvée en 5, on déduit :

$$\frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}}}{[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}}} = 10^{-0,7}$$

$$\text{donc : } [\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}} = \frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}}}{10^{-0,7}} = \frac{2,0 \times 10^{-6}}{2,0 \times 10^{-1}} = 2,0 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

11. Du tableau d'avancement, on déduit :

$$[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}} \cdot V = C \cdot V - x_f = C \cdot V - [\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}} \cdot V$$

$$\text{d'où } C = [\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]_{\text{éq}} + [\text{HCO}_3^-]_{\text{éq}} = 2,0 \times 10^{-5} + 2,0 \times 10^{-6} = 2,2 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

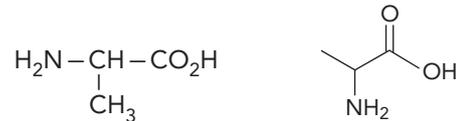
32 Point isoélectrique de la glycine

1. a. Les formules semi-développée et topologique de la glycine sont représentées ci-dessous :

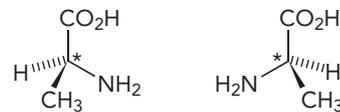


b. Cette molécule ne comporte pas d'atome de carbone asymétrique : le seul atome de carbone qui comporte quatre liaisons, l'atome de carbone n° 2, est lié à deux atomes d'hydrogène ; il n'a donc pas quatre substituants différents et n'est donc pas un atome de carbone asymétrique.

c. Pour l'alanine, les formules semi-développée et topologique sont représentées ci-dessous :

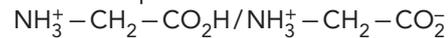


Pour l'alanine, l'atome de carbone n° 2 est asymétrique, les deux stéréoisomères correspondants sont :



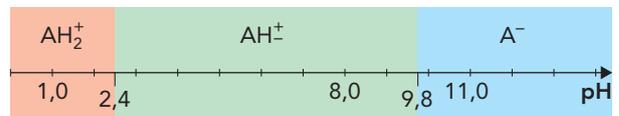
2. L'amphion associé à la glycine est $\text{NH}_3^+ - \text{CH}_2 - \text{CO}_2^-$

3. L'amphion est un ampholyte, il appartient à deux couples acido-basiques :



et $\text{NH}_3^+ - \text{CH}_2 - \text{CO}_2^- / \text{NH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CO}_2^-$

4. Le diagramme de prédominance de la glycine est :



5. La glycine apportée en solution réagit avec l'eau et se présente sous l'une de ses trois formes. L'une est majoritaire selon le pH et les deux autres très minoritaires. Donc on a bien $C = [\text{AH}_2^+] + [\text{AH}^\pm] + [\text{A}^-]$ pour tout pH.

6. a. Voir le diagramme ci-dessus.

b. À $\text{pH} = 1,0$, AH_2^+ est majoritaire, AH^\pm et A^- sont minoritaires et leurs concentrations sont négligeables, donc :

$$[\text{AH}_2^+] = C$$

À $\text{pH} = 8,0$, AH^\pm est majoritaire, AH_2^+ et A^- sont minoritaires et leurs concentrations sont négligeables, donc :

$$[\text{AH}^\pm] = C$$

À $\text{pH} = 11,0$, A^- est majoritaire, AH_2^+ et AH^\pm sont minoritaires et leurs concentrations sont négligeables, donc :

$$[\text{A}^-] = C$$

Dans les trois cas :

$$C = \frac{n}{V} = \frac{m}{M \cdot V} = \frac{1,50}{(2,0 \times 12,0 + 2 \times 16,0 + 14,0 + 5 \times 1,0) \times 1,00} = 2,00 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$7. K_{A1} \cdot K_{A2} = \frac{[\text{AH}^\pm]_{\text{éq}} \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}}{[\text{AH}_2^+]_{\text{éq}}} \cdot \frac{[\text{A}^-]_{\text{éq}} \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}}{[\text{AH}^\pm]_{\text{éq}}} = \frac{[\text{A}^-]_{\text{éq}} \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]_{\text{éq}}^2}{[\text{AH}_2^+]_{\text{éq}}}$$

8. De la relation précédente on déduit :

$$\log(K_{A_1} \cdot K_{A_2}) = \log \frac{[A^-]_{\text{éq}}}{[AH_2^+]_{\text{éq}}} + \log [H_3O^+]_{\text{éq}}^2$$

soit : $-pK_{A_1} - pK_{A_2} = \log \frac{[A^-]_{\text{éq}}}{[AH_2^+]_{\text{éq}}} - 2 \cdot \text{pH}$

On en déduit :

$$\text{pH} = \frac{1}{2} \cdot (pK_{A_1} + pK_{A_2} - \log \frac{[A^-]_{\text{éq}}}{[AH_2^+]_{\text{éq}}})$$

Le point isoélectrique est donc tel que $[A^-] = [AH_2^+]$.

9. Le point isoélectrique de la glycine se trouve donc au $\text{pH} = \frac{1}{2} \times (2,4 + 9,8) = 6,1$.

Retour sur l'ouverture du chapitre

33 pH du sang lors d'un effort

1. $K_{A_1} = \frac{[HCO_3^-]_{\text{éq}} \cdot [H_3O^+]_{\text{éq}}}{[CO_2, H_2O]_{\text{éq}}}$

On en déduit :

$$-\log K_{A_1} = -\log \frac{[HCO_3^-]_{\text{éq}} \cdot [H_3O^+]_{\text{éq}}}{[CO_2, H_2O]_{\text{éq}}}$$

$$-\log K_{A_1} = -\log [H_3O^+]_{\text{éq}} - \log \frac{[HCO_3^-]_{\text{éq}}}{[CO_2, H_2O]_{\text{éq}}}$$

soit : $\text{pH} = pK_{A_1} + \log \frac{[HCO_3^-]_{\text{éq}}}{[CO_2, H_2O]_{\text{éq}}}$

2. $\frac{[HCO_3^-]_{\text{éq}}}{[CO_2, H_2O]_{\text{éq}}} = 10^{\text{pH} - pK_{A_1}} = 10^{7,4 - 6,1} = 20$

3. Si, au voisinage du muscle, la concentration en dioxyde de carbone dissous dans le sang augmente, le rapport précédent diminue, ce qui implique que le pH diminue. Le sang s'acidifie.

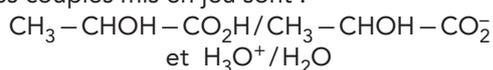
4. a. Si, au voisinage du muscle, la concentration du dioxyde de carbone dissous augmente, l'équilibre associé à la réaction (2) évolue dans le sens direct. En conséquence, le dioxyde de carbone excédentaire est consommé et fixé par l'hémoglobine qui a apporté le dioxygène vers le muscle.

b. Au voisinage du poumon, la concentration du dioxygène dissous dans le sang augmente. L'équilibre associé à la réaction (2) évolue dans le sens inverse. En conséquence, le dioxyde de carbone est libéré par l'hémoglobine qui fixe le dioxygène. Il est ensuite expiré par les poumons.

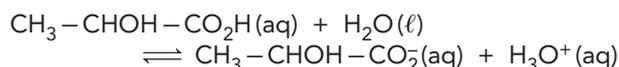
c. En évacuant le dioxyde de carbone dissous produit par les cellules (qui est responsable de la diminution de pH du sang), la respiration permet de réguler cette valeur du pH et de la maintenir dans le domaine de valeurs compatible avec la vie.

5. Dans la théorie de Brønsted, un acide est une espèce chimique capable de céder au moins un proton H^+ (ou ion hydrogène).

6. Les couples mis en jeu sont :



L'équation de la réaction entre l'acide lactique et l'eau s'écrit :



7. On calcule tout d'abord les quantités initiales des espèces HCO_3^- et CO_2, H_2O :

$$n_i(HCO_3^-) = [HCO_3^-]_i \cdot V = 2,7 \times 10^{-2} \times 100 \times 10^{-3} = 2,7 \times 10^{-3} \text{ mol};$$

$$n_i(CO_2, H_2O) = [CO_2, H_2O]_i \cdot V = 1,4 \times 10^{-3} \times 100 \times 10^{-3} = 1,4 \times 10^{-4} \text{ mol}.$$

Voir le tableau d'avancement, en mol, en fin de chapitre, p. 144.

L'avancement maximal est atteint si le réactif limitant est entièrement consommé. Il s'agit ici de l'acide lactique, ce qui conduit à la valeur de :

$$x_{\text{max}} = 3,0 \times 10^{-4} \text{ mol}.$$

On en déduit le bilan de matière suivant à l'état final (voir le tableau en fin de chapitre, p. 144).

8. On déduit du bilan de matière précédent :

$$[HCO_3^-] = \frac{n_f(HCO_3^-)}{V} = 2,4 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot L^{-1}$$

$$[CO_2, H_2O] = \frac{n_f(CO_2, H_2O)}{V} = 4,4 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot L^{-1}$$

9. $\text{pH} = pK_{A_1} + \log \frac{[HCO_3^-]_f}{[CO_2, H_2O]_f} = 6,1 + \log \frac{2,4 \times 10^{-2}}{4,4 \times 10^{-3}} = 6,8$

Après l'effort, le pH du sang est passé de 7,4 à 6,8. Cela est bien conforme aux prévisions faites à la question 3.

Comprendre un énoncé

34 Étude du pH d'un mélange

1. a. Les couples mis en jeu sont HNO_2 / NO_2^- et H_3O^+ / H_2O .

L'équation de la réaction entre l'acide nitreux et l'eau est :

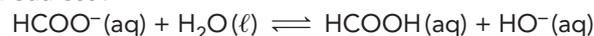


b. La constante d'acidité associée au couple de l'acide nitreux est :

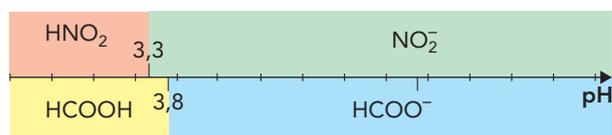
$$K_A = \frac{[NO_2^-]_{\text{éq}} \cdot [H_3O^+]_{\text{éq}}}{[HNO_2]_{\text{éq}}}$$

2. L'ion méthanoate étant la base d'un couple, il réagit avec l'eau considérée en tant qu'acide. Les couples mis en jeu sont donc $HCOOH / HCOO^-$ et H_2O / HO^- .

L'équation de la réaction entre l'ion méthanoate et l'eau est :



3. a. Les domaines de prédominance des deux couples acide/base mis en jeu sont représentés ci-dessous :

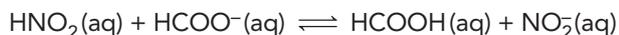


b. La solution d'acide nitreux a un pH égal à 2,0; c'est l'espèce HNO_2 qui y prédomine.

La solution de méthanoate de sodium a un pH égal à 8,7; c'est l'ion méthanoate HCOO^- qui y prédomine.

4. Les couples mis en jeu sont $\text{HNO}_2/\text{NO}_2^-$ et $\text{HCOOH}/\text{HCOO}^-$.

De plus, le système atteint un état d'équilibre. L'équation de la réaction entre l'acide nitreux et l'ion méthanoate est donc :



5. a. Les quantités initiales de réactifs sont :

– pour l'acide nitreux :

$$n_1 = C_1 \cdot V_1 = 0,20 \times 200 \times 10^{-3} = 4,0 \times 10^{-2} \text{ mol};$$

– pour le méthanoate de sodium :

$$n_2 = C_2 \cdot V_2 = 0,40 \times 200 \times 10^{-3} = 8,0 \times 10^{-2} \text{ mol}.$$

b. Voir le tableau d'avancement, en mol, en fin de chapitre, p. 144.

6. Les concentrations des différentes espèces chimiques présentes à l'équilibre sont :

$$[\text{HNO}_2]_f = \frac{n_f(\text{HNO}_2)}{2 \cdot V} = \frac{0,7 \times 10^{-2}}{2 \times 200 \times 10^{-3}} = 1,75 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$[\text{HCOO}^-]_f = \frac{n_f(\text{HCOO}^-)}{2 \cdot V} = \frac{4,7 \times 10^{-2}}{2 \times 200 \times 10^{-3}} = 1,18 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1};$$

$$[\text{HCOOH}]_f = \frac{n_f(\text{HCOOH})}{2 \cdot V} = \frac{3,3 \times 10^{-2}}{2 \times 200 \times 10^{-3}} = 8,25 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} = [\text{NO}_2^-].$$

7. On considère le $\text{p}K_{A_1}$ du couple de l'acide nitreux. Son expression conduit à :

$$\text{pH} = \text{p}K_{A_1} + \log \frac{[\text{NO}_2^-]_f}{[\text{HNO}_2]_f} = 3,3 + \log \frac{8,25 \times 10^{-2}}{1,75 \times 10^{-2}} = 4,0.$$

Le même calcul mené à partir du $\text{p}K_{A_2}$ du couple de l'acide méthanoïque conduit au même résultat.

Bibliographie et sitographie

- A. DURUPHTY (dir.), *Chimie MPSI-PCSI-PTSI*, 1^{re} année, Édition spéciale, Hachette, collection HPrépa, 2003.
 - A. DURUPHTY (dir.), *Chimie, PC*, 1^{re} année, Hachette, collection HPrépa Tout en un, 2007.
 - M. DUMOULIN et J. MESPLÈDE, *Un pas vers la Sup en Chimie. De la terminale à la prépa MPSI-PCSI-PTSI*, Bréal, 2005.
 - J.-C. CHOTARD, J.-C. DEPEZAY et J.-P. LEROUX. *Chimie fondamentale, études biologiques et médicales*, Hermann, 1998.
- Pour les équilibres acido-basiques, voir le site <http://www.respir.com/doc/abonne/base/EquilibreAcideBase.asp>

Exercice 10, question 1.

Équation chimique	$\text{HCO}_2\text{H}(\text{aq})$	+	$\text{H}_2\text{O}(\ell)$	\rightleftharpoons	$\text{HCO}_2^-(\text{aq})$	+	$\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$
État initial ($x = 0$)	50		Solvant		0		0
État intermédiaire (x)	$50 - x$		Solvant		x		x
État final (x_f)	$50 - x_f$		Solvant		x_f		x_f

Exercice 11, question 1.

Équation chimique	$\text{HBr}(\text{g})$	+	$\text{H}_2\text{O}(\ell)$	\longrightarrow	$\text{Br}^-(\text{aq})$	+	$\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$
État initial ($x = 0$)	0,126		Solvant		0		0
État intermédiaire (x)	$0,126 - x$		Solvant		x		x
État final (x_f)	$0,126 - x_f$		Solvant		x_f		x_f

Exercice 16, question 1.

Équation chimique	$2 \text{H}_2\text{O}(\ell)$	\rightleftharpoons	$\text{HO}^-(\text{aq})$	+	$\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$
État initial ($x = 0$)	n_0		0		0
État intermédiaire (x)	$n_0 - 2x$		x		x
État final (x_f)	$n_0 - 2x_f$		x_f		x_f

Exercice 25, question 1.

Équation chimique	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2(\text{aq})$	+	$\text{H}_2\text{O}(\ell)$	\rightleftharpoons	$\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_2^-(\text{aq})$	+	$\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$
État initial ($x = 0$)	$C \cdot V$		Solvant		0		0
État intermédiaire (x)	$C \cdot V - x$		Solvant		x		x
État final ($x_f = x_{\text{éq}}$)	$C \cdot V - x_{\text{éq}}$		Solvant		$x_{\text{éq}}$		$x_{\text{éq}}$

Exercice 26, question 4.

Équation chimique	$C_2H_5NH_2(aq)$	+	$H_2O(\ell)$	\rightleftharpoons	$C_2H_5NH_3^+(aq)$	+	$HO^-(aq)$
État initial ($x = 0$)	$C \cdot V$		Solvant		0		0
État intermédiaire (x)	$C \cdot V - x$		Solvant		x		x
État final ($x_{\text{éq}}$)	$C \cdot V - x_{\text{éq}}$		Solvant		$x_{\text{éq}}$		$x_{\text{éq}}$

Exercice 31, question 8.

Équation chimique	$CO_2, H_2O(\ell)$	+	$H_2O(\ell)$	\rightleftharpoons	$HCO_3^-(aq)$	+	$H_3O^+(aq)$
État initial ($x = 0$)	$C \cdot V$		Solvant		0		0
État intermédiaire (x)	$C \cdot V - x$		Solvant		x		x
État final (x_f)	$C \cdot V - x_f$		Solvant		x_f		x_f

Exercice 33, question 7.

Équation chimique	$HA(aq)$	+	$HCO_3^-(aq)$	\rightleftharpoons	$A^-(aq)$	+	$CO_2, H_2O(aq)$
État initial ($x = 0$)	n_0		$2,7 \times 10^{-3}$		0		$1,4 \times 10^{-4}$
État intermédiaire (x)	$n_0 - x$		$2,7 \times 10^{-3} - x$		x		$1,4 \times 10^{-4} + x$
État final (x_f)	$n_0 - x_{\text{max}}$		$2,7 \times 10^{-3} - x_{\text{max}}$		x_{max}		$1,4 \times 10^{-4} + x_{\text{max}}$

Exercice 33, question 7.

	$n_f(AH)$	$n_f(HCO_3^-)$	$n_f(A^-)$	$n_f(CO_2, H_2O)$
État final	0 mol	$2,7 \times 10^{-3} - 3,0 \times 10^{-4}$ $= 2,4 \times 10^{-3}$ mol	$3,0 \times 10^{-4}$ mol	$1,4 \times 10^{-4} + 3,0 \times 10^{-4}$ $= 4,4 \times 10^{-4}$ mol

Exercice 34, question 5b.

Équation chimique	$HNO_2(aq)$	+	$HCOO^-(aq)$	\rightleftharpoons	$HCOOH(aq)$	+	$NO_2^-(aq)$
État initial ($x = 0$)	n_1		n_2		0		0
État intermédiaire (x)	$n_1 - x$		$n_2 - x$		x		x
État final (x_f)	$n_1 - x_f$ $= 4,0 \times 10^{-2} - 3,3 \times 10^{-2}$ $= 0,7 \times 10^{-2}$ mol		$n_2 - x_f$ $= 8,0 \times 10^{-2} - 3,3 \times 10^{-2}$ $= 4,7 \times 10^{-2}$ mol		x_f $= 3,3 \times 10^{-2}$ mol		x_f $= 3,3 \times 10^{-2}$ mol

Transferts macroscopiques d'énergie

Chapitre

14

Activités

1 Du macroscopique au microscopique (p. 350)

1 Des particules macroscopiques sont percutées par des particules microscopiques et, de ce fait, sont animées d'un mouvement aléatoire nommé mouvement brownien.

2 $\overline{x^2}$ est le carré moyen du déplacement selon l'axe x . Il est calculé en faisant la moyenne des carrés des déplacements d'un grain suivant un axe horizontal pendant un intervalle de temps donné. Dans cette relation, l'intervalle de temps est noté t .

3 On déduit de la formule $\frac{\overline{x^2}}{t} = \frac{R \cdot T}{N_A} \cdot \frac{1}{4\pi r^3 \eta}$ que l'activité du mouvement brownien est inversement proportionnelle au nombre d'Avogadro.

Cette activité dépend aussi de la température, de la taille du grain, de la viscosité du liquide et d'une constante R , la constante molaire des gaz parfaits.

4 Lors de la première expérience, J. PERRIN a modifié la taille des grains et la viscosité du liquide pour

prouver que la constante d'Avogadro ne dépend pas des conditions de mesure.

5 J. PERRIN a déterminé le rayon moyen des grains en évaporant l'eau et en alignant les grains selon un axe horizontal.

6 D'après les données de l'énoncé, l'encadrement actuel de la valeur de la constante d'Avogadro est :

$$6,022\,141\,02 \times 10^{23} < N_A < 6,022\,144\,56 \times 10^{23}$$

L'encadrement de J PERRIN était de :

$$5,5 \times 10^{23} < N_A < 8,0 \times 10^{23}.$$

Il est bien compatible avec l'encadrement actuel.

7 Le mouvement brownien a permis, par des observations et des mesures à notre échelle, c'est-à-dire macroscopique, de prouver l'existence de particules infiniment petites appartenant au domaine microscopique.

2 Énergies microscopiques (p. 351)

1 L'archer fournit de l'énergie à l'arc sous forme de travail pour le déformer.

2 L'arc, après avoir été déformé, peut fournir de l'énergie à la flèche pour la mettre en mouvement. Il a donc emmagasiné de l'énergie au préalable. Cette énergie est stockée sous forme d'énergie potentielle élastique.

3 Au niveau microscopique, lorsque l'arc est déformé, la position des atomes les uns par rapport aux autres a été modifiée.

Cette modification correspond à une variation, à l'échelle microscopique, d'énergie potentielle.

4 Lorsque la température du système s'élève, les particules microscopiques ont des mouvements plus rapides. L'énergie cinétique microscopique augmente.

5 L'échauffement de la météorite est dû au travail des forces de frottement entre la météorite et l'atmosphère. Les particules de la météorite voient leur énergie cinétique augmenter.

6 Le Soleil fournit de l'énergie à la sculpture de glace pour la faire fondre.

7 Au niveau microscopique, des interactions entre les molécules d'eau, responsables de la cohésion de la

glace, sont rompues. L'énergie potentielle microscopique est modifiée.

8 Pour définir l'énergie cinétique microscopique d'une particule, il faut préciser qu'en plus d'un mouvement d'ensemble – qualifié de mouvement macroscopique – les particules peuvent avoir un mouvement par rapport au centre d'inertie du système et donc une vitesse dans le référentiel d'inertie. On associe à cette vitesse une énergie cinétique microscopique.

De plus, les particules peuvent interagir entre elles. À ces interactions, on associe une énergie potentielle microscopique.

L'énergie interne est définie comme la somme de toutes ces contributions microscopiques.

On note que, dans le modèle du gaz parfait, les interactions entre les molécules de gaz sont négligées, de telle sorte qu'au niveau microscopique le système ne possède qu'une énergie cinétique. On montre, en théorie cinétique des gaz, que l'énergie interne d'un gaz parfait n'est fonction que de sa température.

Lorsque les interactions entre particules ne sont plus négligeables, on utilise d'autres modèles de gaz : le modèle de Van der Waals par exemple.

3 Constante solaire et transfert thermique (p. 352)

1 Le bloc d'aluminium utilisé a une masse $m = 47,5 \times 10^{-3} \text{ kg}$.

2 φ_S est une puissance par unité de surface, son unité est donc le $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$.

3 L'énergie issue du rayonnement solaire (\mathcal{E}_S) se calcule à partir de la puissance du rayonnement solaire (φ_S), de la surface éclairée (S) et de la durée d'éclairage (Δt):

$$\mathcal{E}_S = \varphi_S \cdot \Delta t \cdot S$$

Ce terme est une énergie, car l'étude des unités des grandeurs utilisées dans la relation donne :

$$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2 = \text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{s} = \text{J}$$

L'énergie stockée dans le métal peut s'exprimer en fonction de sa masse, de sa capacité thermique massique et de sa variation de température :

$$m \cdot c \cdot (\theta_f - \theta_i)$$

Ce terme est une énergie, car une étude des unités donne :

$$\text{kg} \cdot (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}) \cdot ^\circ\text{C} = \text{J}$$

Ces deux énergies sont égales, on obtient :

$$\varphi_S \cdot \Delta t \cdot S = m \cdot c \cdot (\theta_f - \theta_i)$$

Cette formule est homogène puisque les unités sont les mêmes à droite et à gauche de l'égalité (le Joule).

De l'égalité précédente, on déduit : $\varphi_S = \frac{m \cdot c \cdot (\theta_f - \theta_i)}{\Delta t \cdot S}$

d'où, avec les valeurs expérimentales obtenues :

$$\varphi_S = \frac{47,5 \times 10^{-3} \times 895 \times (39,0 - 26,3)}{1000 \times \pi \times \frac{(26 \times 10^{-3})^2}{4}}$$

$$\varphi_S = 1,02 \times 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

4 Puisque 30 % de l'énergie est absorbée par l'atmosphère : $\varphi_S = 0,70 \cdot F$, donc :

$$F = \frac{\varphi_S}{0,70} = \frac{1,02 \times 10^3}{0,70} = 1,45 \times 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Cette valeur est de l'ordre de grandeur des valeurs proposées dans la littérature.

5 On décompose le transfert d'énergie en trois étapes :

- le transfert par rayonnement dans le vide spatial depuis le Soleil jusqu'à l'atmosphère terrestre ;
- le transfert par rayonnement et par convection dans l'atmosphère jusqu'au pyromètre ;
- le transfert par conduction dans le bloc de métal, et entre le bloc et le thermomètre.



4 La résistance thermique (p. 353)

1 a. Le flux thermique φ est une énergie thermique transférée par unité de temps. Il s'exprime donc en watt (W).

b. La résistance thermique R_{th} et le flux sont liés par $\varphi = \frac{T_1 - T_2}{R_{th}}$.

La résistance thermique s'exprime donc en $\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ou $^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$.

2 Le tableau suivant résume quelques mesures :

Matériau	Épaisseur	T_1 (°C)	T_2 (°C)	I (mA)	U (V)	P (W)	R_{th} calculée (°C · W ⁻¹)
Verre	5,0 mm	21,6	14,6	295	14,34	4,23	1,65
Bois	9,0 mm	22,0	7,0	118	5,81	0,68	21,84
PVC	3,0 mm	21,6	9,4	241	11,73	2,82	4,31
Plâtre	9,0 mm	21,6	8,8	192	9,17	1,76	7,26

Puisque $\varphi = \frac{Q}{\Delta t}$ et que l'on considère que l'énergie électrique reçue par le conducteur ohmique est convertie en énergie thermique, puis est totalement transférée à travers la plaque, on a $\varphi = \mathcal{P}$.

Pour chaque condition, on peut déterminer R_{th} et la comparer à la valeur affichée.

3 Lors de la mesure de la résistance thermique, il existe des erreurs, notamment au niveau des mesures des températures, de la tension et de l'intensité du courant.

4 a. Plus la résistance thermique du matériau est élevée, plus le flux thermique est faible à travers le matériau. Ce dernier empêche le transfert d'énergie à travers lui ; c'est un bon isolant thermique.

b. Lorsque plusieurs matériaux sont accolés, la résistance thermique totale est égale à la somme des résistances thermiques de chaque matériau.

5 Ça refroidit dedans et ça chauffe dehors (p. 354-355)

1 Pour comprimer un système, il faut lui fournir de l'énergie (en appuyant dessus par exemple). On en déduit que le travail W est reçu par le système, donc est positif.

2 Une liquéfaction (condensation liquide) correspond à la formation de nouvelles interactions intermoléculaires (Première S), donc elle s'accompagne d'une libération d'énergie. C'est une transformation exothermique.

Une vaporisation correspond à la rupture d'interactions intermoléculaires présentes dans un liquide, donc elle nécessite de l'énergie thermique. C'est une transformation endothermique.

3 a. Le principal mode de transfert thermique est la conduction thermique.

b. Le liquide frigorigère se condense en libérant de l'énergie à l'extérieur, ce qui est perceptible en touchant les tuyaux au dos du réfrigérateur.

4 Le transfert thermique entre le système et l'armoire a lieu lors de la vaporisation endothermique : l'armoire fournit de l'énergie thermique au système, donc elle

perd de l'énergie. La température de l'armoire va diminuer.

5 La variation d'énergie interne de l'eau liquide s'écrit :

$$\Delta U = W + Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

Or, ici, $W = 0$ et $Q = -4,75$ kJ puisque le transfert thermique se fait de l'eau vers le liquide frigorigère. Il vient alors :

$$\Delta T = \frac{Q}{m \cdot c} = -\frac{4750}{4,1 \times 1,00 \times 4180} = -0,27 \text{ }^\circ\text{C}.$$

La température de l'eau liquide baisse d'environ $0,3$ °C lors d'un cycle de fonctionnement.

Exercices (p. 361-373)

QCM

1 1. B; **2** 1. A; 2. A, B et C; **3** C; **3** 1. B; 2. A et C; **3** B et C; **4** A; **4** 1. B; 2. A.

Application immédiate

5 Interpréter des transferts thermiques

Le flux thermique est défini par $\varphi = \frac{\Delta T}{R_{\text{th,bois}}} = \frac{\Delta T}{16 \text{ e}}$
donc $e = \frac{\Delta T}{16 \varphi}$.

Application numérique :

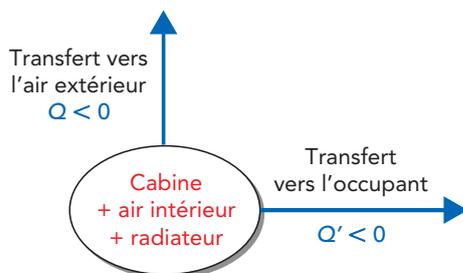
$$e = \frac{30}{16 \times 12} = 0,16 \text{ m, soit } 16 \text{ cm.}$$

Il faudrait un panneau de bois de 16 cm d'épaisseur pour obtenir un flux thermique de 12 W.

6 Faire un bilan d'énergie

1. Après la coupure électrique, le système dont fait partie le radiateur ne reçoit plus de travail électrique. Il y a deux transferts d'énergie à faire intervenir : un transfert vers l'air extérieur et un transfert vers l'occupant.

Ces deux transferts sont négatifs pour le système.



2. Par ailleurs, pour le système $\Delta U = Q + Q'$. Q et Q' sont deux grandeurs négatives, donc la variation d'énergie interne l'est aussi. La température du système diminue puisque son énergie interne diminue.

Pour commencer

7 Connaître l'intérêt de la constante d'Avogadro

1. La constante d'Avogadro représente le nombre d'entités présentes dans une mole de cette entité.

2. La constante d'Avogadro lie les mondes macroscopique et microscopique.

8 Prendre conscience de la valeur de N_A

1. Dans 60 millions de m^3 de sable, il y a :

$$N = \frac{60 \times 10^6}{5 \times 10^{-11}} = 1 \times 10^{18} \text{ grains de sable.}$$

On néglige le volume entre les grains de sable.

2. Le nombre de moles de grain de sable est :

$$n_{\text{grains de sable}} = \frac{N}{N_A} = \frac{1 \times 10^{18}}{6,02 \times 10^{23}} = 2,0 \times 10^{-6} \text{ mol.}$$

3. Il faudrait environ 5×10^5 dunes du Pilat pour rassembler 1 mole de grains de sable.

9 Savoir définir l'énergie interne

L'énergie interne d'un système est la somme de ces énergies potentielle et cinétique microscopiques. L'énergie interne résulte de propriétés microscopiques.

10 Comprendre la variation d'énergie interne d'un système

1. L'énergie interne d'un système peut varier s'il échange avec l'extérieur du travail W et/ou de l'énergie thermique Q . La relation qui en résulte s'écrit :

$$\Delta U = W + Q$$

2. La variation $\Delta U = U_f - U_i$ de l'énergie interne d'un système est positive si l'énergie interne du système augmente ; elle est négative dans le cas contraire.

11 Connaître la relation entre ΔU et c

1. Un corps est dans un état condensé s'il est à l'état liquide ou à l'état solide.

2. La capacité thermique massique c d'un corps est l'énergie nécessaire pour élever de $1\text{ }^\circ\text{C}$ (ou de 1 K) la température d'une masse de 1 kg de ce corps.

3. La relation entre la variation d'énergie interne et la variation de température est :

$$\Delta U = m \cdot c \cdot \Delta T$$

avec ΔU en J , m la masse du système en kg , c la capacité thermique massique en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (ou en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) et ΔT la variation de température du corps exprimée en K ou en $^\circ\text{C}$.

12 Calculer la variation d'énergie interne d'un système

La variation d'énergie interne de la masse m d'eau est liée à sa variation de température par :

$$\Delta U = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1)$$

La masse m se calcule à partir de la masse volumique :

$$m = V_{\text{eau}} \cdot \rho_{\text{eau}}$$

donc :

$$\Delta U = V_{\text{eau}} \cdot \rho_{\text{eau}} \cdot c \cdot (T_2 - T_1)$$

AN: $\Delta U = 1,7 \times 1,00 \times 4,18 \times 10^3 \times (64 - 20) = 3,1 \times 10^5\text{ J}$.

L'énergie interne de ce volume d'eau a augmenté de $3,1 \times 10^5\text{ J}$.

13 Calculer une variation d'énergie interne

1. L'énergie interne d'un système peut varier si le système échange avec l'extérieur de l'énergie par travail ou par transfert thermique.

2. Les flèches indiquent le sens du transfert énergétique. W et Q_1 sont reçus par le système, donc $W > 0$ et $Q_1 > 0$.

Le système perd Q_2 par transfert thermique, donc $Q_2 < 0$.

3. La variation d'énergie interne est :

$$\Delta U = W + Q_1 + Q_2 = 120 + 100 - 200 = +20\text{ J}$$

L'énergie interne du système augmente de 20 J .

14 Identifier des modes de transferts thermiques

a. Le transfert thermique du Soleil vers le sac se fait par rayonnement.

b. Le transfert thermique du sac vers l'eau se fait par conduction.

c. Le transfert thermique dans l'eau se fait par convection.

15 Illustrer des modes de transferts thermiques

a. Il y a des transferts thermiques par conduction entre la piscine et le sol qui l'entoure, entre l'eau de la piscine et la couche d'air à son contact.

b. Il y a des transferts thermiques par convection dans l'eau de la piscine, dans l'air.

c. Il y a des transferts thermiques par rayonnement entre le Soleil et la piscine, et entre le Soleil et le sol.

16 Reconnaître un mode de transfert

1. La température de la plaque augmente, son énergie interne également.

2. La plaque reçoit un travail mécanique de la force de frottement de la scie sur la plaque. Ce travail

augmente localement la température de la plaque. Il y a ensuite un transfert thermique par conduction dans toute la plaque.

17 Calculer et exploiter un flux thermique

1. a. Le flux thermique qui traverse la plaque de cuivre est :

$$\phi_{\text{Cu}} = \frac{Q_{\text{Cu}}}{\Delta t} = \frac{4,4 \times 10^6}{15 \times 60} = 4,9 \times 10^3\text{ W}$$

b. Le flux thermique qui traverse la plaque d'aluminium est :

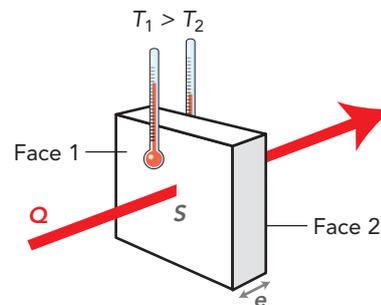
$$\phi_{\text{Al}} = \frac{|\Delta T|}{R_{\text{th,Al}}} = \frac{5,0}{1,7 \times 10^{-2}} = 2,9 \times 10^2\text{ W}$$

2. Pour des dimensions identiques, le flux thermique qui traverse une plaque d'aluminium est moins important que celui qui traverse une plaque de cuivre.

Un flux thermique est l'énergie transférée à travers une surface par unité de temps. Le cuivre est donc le métal qui transfère le plus rapidement l'énergie thermique.

18 Calculer une énergie thermique transférée

1.



Le flux thermique est orienté de la source chaude (l'intérieur) vers la source froide (l'extérieur).

2. Le flux thermique s'exprime par :

$$\phi = \frac{|T_i - T_e|}{R_{\text{th,vitre}}} = \frac{(19 - (-1))}{5,0 \times 10^{-3}} = \frac{20}{5,0 \times 10^{-3}}$$

soit $\phi = 4,0 \times 10^3\text{ W}$.

Le flux thermique à travers la vitre est de $4,0 \times 10^3\text{ W}$.

3. L'énergie thermique transférée s'écrit :

$$Q = \phi \cdot \Delta t$$

avec Δt exprimé en seconde.

En $1,25\text{ h}$, elle a pour valeur :

$$Q = 4,0 \times 10^3 \times 1,25 \times 3\,600 = 1,8 \times 10^7\text{ J}$$

19 Établir un bilan énergétique

1. Le système étudié est l'eau contenue dans le cumulus.

2. La résistance, lorsqu'elle est traversée par un courant électrique, transfère à l'eau de l'énergie par travail électrique W_{elec} .

La température de l'eau diminue, donc elle perd de l'énergie Q par transfert thermique.

3. L'eau reçoit de l'énergie par travail, donc $W > 0$, et en perd par transfert thermique, $Q < 0$. L'énergie reçue par rayonnement est négligeable.

4.



Pour s'entraîner

20 Des nombres astronomiques à l'échelle microscopique!

- La constante d'Avogadro représente le nombre d'entités présentes dans une mole de cette entité (atomes, ions, molécules, etc.).
- La conversion s'effectue en divisant par la constante d'Avogadro :
 - $n(\text{humains}) = 1,2 \times 10^{-14} \text{ mol}$;
 - $n(\text{étoiles, Voie Lactée}) = 3,89 \times 10^{-13} \text{ mol}$;
 - $n(\text{étoiles, Univers}) = 0,1 \text{ mol}$.
- Le nombre d'entités microscopiques présentes dans un système macroscopique étudié en chimie est gigantesque (il y a presque dix fois plus d'atomes dans une mole que d'étoiles dans tout l'Univers). Travailler avec des quantités de matière permet de manipuler plus commodément des nombres. Cette grandeur est adaptée à l'échelle macroscopique.

21 Chacun son domaine et les unités seront bien gardées!

- À l'aide des données de l'énoncé, on calcule :
 - $\frac{R}{k_B} = 6,02 \times 10^{-23} \text{ mol}^{-1} \approx N_A$
 - $\frac{F}{e} = 6,03 \times 10^{-23} \text{ mol}^{-1} \approx N_A$
 - D'après la définition de l'unité de masse atomique :

$$1 \text{ u} = \frac{1}{12} \times m(1 \text{ atome } ^{12}\text{C}) = \frac{1}{12 N_A} m(1 \text{ mol } ^{12}\text{C})$$

$$1 \text{ u} = \frac{1}{12 N_A} \times 1 \times M(^{12}\text{C}) = \frac{1}{N_A} \text{ g}$$
 On retrouve encore une fois le nombre d'Avogadro.
- Le passage d'un domaine à l'autre se faisant grâce à la constante d'Avogadro :

Domaine microscopique	Domaine macroscopique
k_B	R
e	F
1 u	1 g

- Certaines unités sont mal adaptées à l'échelle micro ou macroscopique. Il est souvent plus commode de manipuler des nombres qui ne sont ni infiniment petits, ni infiniment grands (sans puissance de dix), d'où l'introduction de nouvelles unités comme celle de masse atomique, plus facile à manipuler que $1,66 \times 10^{-24} \text{ g}$.

22 Calculer une variation de température

- La température de l'huile diminue ; il en est de même pour son énergie interne. La variation d'énergie interne de l'huile est donc négative.
- La variation d'énergie interne de l'huile s'exprime par :

$$\Delta U = m \cdot c \cdot (T_f - T_i)$$
 avec m la masse de l'huile.

$$m = V_{\text{huile}} \cdot d_{\text{huile}} \cdot \rho_{\text{eau}}$$

$$\text{d'où } \Delta U = V_{\text{huile}} \cdot d_{\text{huile}} \cdot \rho_{\text{eau}} \cdot (T_f - T_i)$$

$$\text{On en déduit : } T_f = \frac{\Delta U}{V_{\text{huile}} \cdot d_{\text{huile}} \cdot \rho_{\text{eau}} \cdot c_{\text{huile}}} + T_i$$

$$\text{AN : } T_f = \frac{-2,2 \times 10^5}{5,0 \times 0,81 \times 1,00 \times 2000} + 50 \text{ soit } T_f \approx 23 \text{ }^\circ\text{C}.$$

23 Une ou plusieurs couches?

- Le matériau le mieux adapté aux vêtements d'hiver est celui qui a la résistance thermique la plus élevée, c'est-à-dire le feutre.
- Lorsqu'on accole plusieurs matériaux, la résistance thermique totale est la somme des résistances thermiques de chacun des matériaux.
- Entre deux vêtements est emprisonnée une fine épaisseur d'air.
 - On constate que, pour une même épaisseur e , l'air a une résistance thermique plus élevée que les matériaux présentés. C'est donc un bon isolant thermique. Deux vêtements de même épaisseur, l'un constitué d'un tissu unique et l'autre d'une superposition de tissus fins, n'ont pas la même résistance thermique. La résistance du tissu épais est plus faible que la somme de la résistance des tissus fins et de celle de l'air emprisonné dans ces tissus.

24 Mesure d'une résistance thermique

- La résistance thermique se calcule à partir de l'expression du flux thermique.

$$R_{\text{th}} = \frac{|T_1 - T_2|}{\varphi} = \frac{20,0 - 8,0}{0,100} = 120 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}.$$
 La résistance thermique de cette plaque d'aluminium est de $120 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$.

- La résistance thermique de l'appareil est la résistance de la plaque de polystyrène plus celle des deux plaques d'aluminium :

$$R_{\text{th,tot}} = R_{\text{th}} + 2 R'_{\text{th}}$$

La résistance thermique des plaques d'aluminium doit être faible devant celle du polystyrène pour que la valeur mesurée soit identifiable à la résistance thermique du polystyrène.

- On vérifie que $2 R'_{\text{th}} \ll R_{\text{th}}$; la résistance thermique de l'aluminium est négligeable devant celle du polystyrène.

- $U(\varphi) = 0,06 \times 0,100 = 0,006 \text{ W}$
La valeur du flux thermique a une valeur encadrée par : $0,094 \text{ W} < \varphi < 0,106 \text{ W}$

- $U(\Delta T) = \sqrt{U(T_1)^2 + U(T_2)^2} = \sqrt{0,2^2 + 0,2^2} = 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$
d'où $11,7 \text{ }^\circ\text{C} < \Delta T < 12,3 \text{ }^\circ\text{C}$.

- À partir de la formule de calcul d'incertitude du texte et de $R_{\text{th}} = \frac{|\Delta T|}{\varphi}$, on déduit :

$$U(R_{\text{th}}) = R_{\text{th}} \cdot \sqrt{\left(\frac{U(\Delta T)}{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{U(\varphi)}{\varphi}\right)^2}$$

$$U(R_{\text{th}}) = 120 \times \sqrt{\left(\frac{0,3}{12}\right)^2 + \left(\frac{0,006}{0,100}\right)^2}$$

$$U(R_{\text{th}}) = 8 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

- d'où $112 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} < R_{\text{th}} < 128 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$,
ce qui s'écrit aussi $R_{\text{th}} = 120 \pm 8 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$.

25 Four à micro-ondes

- La fréquence des ondes décrites est comprise entre 10^9 et 10^{11} Hz , ce qui correspond bien, d'après le spectre des ondes électromagnétiques, au domaine des micro-ondes.

La longueur d'onde dans le vide se calcule par :

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \times 10^8}{2,450 \times 10^9} = 0,122 \text{ m.}$$

2. Du magnétron à l'eau liquide, le transfert thermique s'effectue par rayonnement. De l'eau liquide aux autres parties de l'aliment, il s'effectue par conduction thermique.

3. a. Pour une masse m d'eau, la variation d'énergie interne s'écrit :

$$\Delta U = m \cdot c(\text{H}_2\text{O}(\ell)) \cdot (T_f - T_i)$$

AN :

$$\Delta U = 0,500 \times 4,18 \times 10^3 \times (40,8 - 18,2)$$

$$\Delta U = 47,2 \times 10^3 = 47,2 \text{ kJ}$$

ΔU est positive, ce qui est cohérent avec l'augmentation de la température de l'eau.

b. L'énergie consommée par le four est :

$$\mathcal{E}_{\text{cons}} = 750 \times 90 = 67,5 \text{ kJ.}$$

c. Le rendement de conversion du four est :

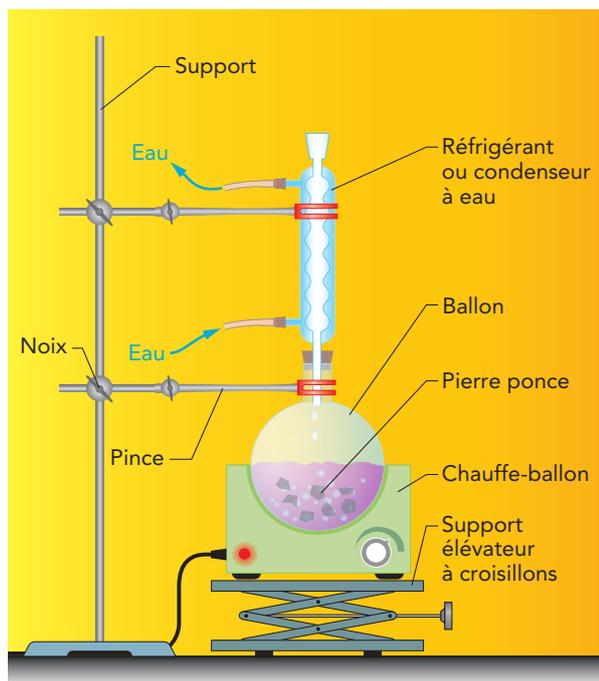
$$\rho = \frac{\Delta U}{\mathcal{E}_{\text{cons}}} = 0,70.$$

Le rendement de conversion du four est de 70 %.

26 Chauffage à reflux

1. Il faut utiliser un chauffe-ballon et un ballon muni d'une colonne réfrigérante à air ou, plus efficace, à eau.

Pour pouvoir arrêter le chauffage rapidement, il faut installer le montage sur un support élévateur.



2. Par conduction thermique entre le chauffe-ballon et le ballon, le contenu de celui-ci est chauffé, son énergie interne croît. Il y a aussi des courants de convection au sein du mélange liquide. Quand la température est suffisamment élevée, le corps le plus volatil (en général le solvant) est vaporisé (rupture des interactions intermoléculaires qui assuraient la cohésion du liquide).

Les vapeurs atteignent la colonne réfrigérante et y sont refroidies (par conduction essentiellement dans un réfrigérant à air et par conduction et convection dans

un réfrigérant à eau). L'agitation thermique et donc la température diminuent (l'énergie interne de la phase vapeur décroît) jusqu'à atteindre la température de changement d'état et les vapeurs se condensent (l'agitation thermique n'est plus suffisante pour empêcher les interactions moléculaires, assurant la cohésion du liquide, de s'établir). Le liquide retombe dans le ballon et il est de nouveau chauffé.

3. Ce montage permet de chauffer le milieu réactionnel, ce qui accélère la réaction, sans perte de matière.

27 À chacun son rythme

1. a. L'eau est en contact avec l'air et avec le sac plastique.

b. Il y a transfert thermique par conduction entre l'eau froide et le sac plastique ainsi qu'entre l'eau froide et l'air. Il y a aussi un transfert thermique par rayonnement entre l'eau froide et le milieu extérieur, mais le texte indique qu'il est négligeable.

2. a. Les températures des faces intérieure et extérieure du sac plastique sont de 22 °C et 2 °C.

$$R_{\text{th,plastique}} = \frac{|T_e - T_i|}{\phi} = \frac{22 - 2}{200}$$

$$R_{\text{th,plastique}} = 1 \times 10^{-1} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}.$$

b. La résistance thermique du sac en plastique est bien plus grande que celle du seau en acier.

c. Le sac plastique s'oppose bien mieux au transfert thermique que le seau en acier. Un sac plastique conserve plus longtemps une bouteille au frais qu'un seau en acier de mêmes dimensions.

28 Coup de chaud au bureau

1. Le processeur étant en contact avec les ailettes, il leur transfère de l'énergie par conduction thermique. Son énergie interne et sa température diminuent (celles des ailettes augmentent). À leur tour, les ailettes transfèrent de l'énergie par conduction à l'air qui est en contact avec elles.

2. Le flux thermique est d'autant plus élevé que la surface de contact entre les deux corps est grande, d'où un refroidissement plus efficace.

Associer un ventilateur au radiateur permet de transférer l'énergie des ailettes à l'air par conduction et améliore sensiblement la convection (en renouvelant l'air), d'où un refroidissement plus efficace.

3. L'eau est un meilleur conducteur thermique que l'air ; de plus, on peut refroidir le processeur par l'intérieur et non juste par les surfaces externes.

29 Un isolant, la laine de verre

1. La résistance thermique se calcule à partir du flux thermique et de l'écart de température :

$$R_{\text{th1}} = \frac{|\Delta T|}{\phi_1} = \frac{15}{10} = 1,5 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}.$$

2. Pour la laine de verre 2, il faut utiliser l'énergie transférée :

$$\phi_2 = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{|T_B - T_A|}{R_{\text{th2}}}$$

$$\text{d'où } R_{\text{th2}} = \frac{\Delta t \cdot |T_B - T_A|}{Q} = \frac{2,0 \times 3\,600 \times (30 - 10)}{36 \times 10^3}$$

$$R_{\text{th2}} = 4,0 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}.$$

3. a. Par étude des unités des grandeurs de la relation, on trouve λ en $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ ou $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

b. AN :

$$\lambda_1 = \frac{e_1}{S_1 R_{\text{th}1}} = \frac{60 \times 10^{-3}}{1,0 \times 1,5} = 4,0 \times 10^{-2} \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$$

$$\lambda_2 = \frac{e_2}{S_2 R_{\text{th}2}} = \frac{240 \times 10^{-3}}{4,0 \times 1,5} = 4,0 \times 10^{-2} \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$$

4. La conductivité thermique est indépendante de l'épaisseur du matériau. Sa valeur caractérise les propriétés d'un matériau à faciliter les transferts thermiques.

5. Le flux thermique s'exprime par :

$$\varphi = \frac{\lambda \cdot S \cdot |\Delta T|}{e}$$

6. Lorsqu'on double la surface de laine de verre, le flux thermique double.

7. Lorsqu'on double l'épaisseur de laine de verre, le flux thermique est divisé par deux.

8. Les pertes d'énergie sont d'autant plus grandes que le flux thermique est élevé. Pour limiter les pertes d'énergie par la toiture, il faut limiter sa surface et augmenter l'épaisseur de laine de verre.

30 Identifier des transferts d'énergie

1. On considère le système {canette + boisson}. Il reçoit de l'énergie sous forme de transfert thermique, puisque sa température augmente, par rayonnement et par conduction.

2. Si la température ne varie plus, on peut seulement affirmer que la variation d'énergie interne du système est nulle.

La température du système est plus grande que celle de l'extérieur; il y a donc un transfert thermique du système vers l'extérieur. Ce transfert thermique est compensé par rayonnement.

3. La masse de boisson contenue dans la canette est :

$$m_{\text{eau}} = \rho_{\text{eau}} \cdot V_{\text{eau}}$$

La variation d'énergie interne du système {canette + boisson} s'écrit :

$$\Delta U = Q = m_{\text{Al}} \cdot c_{\text{Al}} \cdot \Delta T_{\text{Al}} + m_{\text{eau}} \cdot c_{\text{eau}} \cdot \Delta T_{\text{eau}} = 39 \text{ kJ.}$$

31 Stop!

1. Il y a une conversion de l'énergie cinétique en énergie thermique par le biais du travail dû aux frottements des plaquettes de frein sur les disques de frein.

2. L'énergie transmise est l'énergie cinétique de la voiture :

$$\mathcal{E}_c = 7,5 \times 10^5 \text{ J.}$$

3. On utilise la relation qui lie la variation de température et la variation d'énergie interne de l'eau :

$$\Delta U = m \cdot c_{\text{eau}} \cdot \Delta T = \mathcal{E}_c \quad \text{soit } \Delta T = 36 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Il y a donc une élévation de la température de l'eau de 36 °C.

Pour aller plus loin

32 Récupérer de l'énergie gratuite dans la nature

1. Durant un cycle de fonctionnement, le système PAC :
– reçoit un travail électrique W qui est compté positivement;

– reçoit, de la part de l'extérieur, le transfert thermique Q_{ext} qui est compté positivement;

– fournit, à l'intérieur de l'habitation, un transfert thermique Q_{int} qui est compté négativement.

2. Par définition, et puisque la relation puissance-énergie s'écrit $\mathcal{P} = \frac{\mathcal{E}}{\Delta t}$, le coefficient de performance de la pompe à chaleur s'exprime par :

$$\text{COP} = -\frac{Q_{\text{int}}}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta t}{W} = -\frac{Q_{\text{int}}}{W}$$

qui est bien positif puisque $Q_{\text{int}} < 0$ et $W > 0$.

3. On cherche la valeur de W :

$$W = -\frac{Q_{\text{int}}}{\text{COP}}$$

Or, pour chauffer cette habitation et la maintenir à T_{int} , il faut compenser les pertes thermiques qui ont été évaluées à $Q_{\text{pertes}} = -874 \text{ kJ}$ pour le système habitation pendant 3 heures.

Il faut donc que $Q_{\text{int}} = Q_{\text{pertes}}$. Il vient donc :

$$W = -\frac{-874}{4} \approx 219 \text{ kJ.}$$

Pour maintenir la température intérieure à T_{int} pendant 3 heures, cette PAC consomme environ $2,2 \times 10^2 \text{ kJ}$.

4. Un COP supérieur à 1 montre que l'on récupère plus d'énergie (ici Q_{int} en valeur absolue) que ce que l'on consomme pour faire fonctionner la machine. Grâce à l'énergie gratuite fournie par l'air extérieur, ce genre de machine permet de réaliser des économies d'énergie.

33 Convection in Earth's mantle

Traduction du texte :

« Des fluides chauffés par le bas du récipient et loin des conditions d'équilibre de la conduction s'organisent en cellules de convection. Dans les conditions du manteau terrestre, les roches sont généralement considérées comme des fluides.

La convection mantellique est assez différente de la métaphore habituelle du pot posé sur une cuisinière. Le paramètre manquant dans les expériences de laboratoire et à la cuisine, dans la plupart des simulations informatiques, est la pression. Le manteau est chauffé par l'intérieur, se refroidit par-dessus et latéralement. Tous ces effets sont le moteur des mouvements de convection. »

1. Les trois modes de transfert thermique sont la conduction thermique, la convection thermique et le rayonnement.

2. C'est la convection thermique qui est principalement mise en jeu au sein d'un fluide dans une casserole et au sein du manteau terrestre.

3. La décroissance radioactive est responsable du chauffage interne des roches mantelliennes.

4. Le modèle du fluide chauffé dans une casserole est trop simpliste. Si on retrouve bien le gradient de température à l'origine du mouvement de convection, il faut aussi tenir compte de la pression (facteur très important).

34 Que calor !

1. Les transferts thermiques par conduction et convection sont limités par le vide entre les parois; le couvercle limite aussi la convection. Le rayonnement est limité grâce aux surfaces argentées réfléchissantes.

2. La variation d'énergie interne du système {cuivre} s'écrit :

$$\Delta U = m_2 \cdot c_2 \cdot (T_f - T_2)$$

Remarque: le bilan devrait être enthalpique et non en énergie interne, l'évolution se fait à pression constante et non à volume constant; mais pour des phases condensées, il y a en général peu d'écart entre les variations d'énergie interne et celles d'enthalpie du système.

3. Ce système n'échange aucun travail ($W = 0$), mais il échange de l'énergie thermique :

- Q_a avec l'eau initialement froide, négative, car cédée par le cuivre (corps chaud) à l'eau (corps froid);
- Q_b avec le calorimètre, négative, car cédée par le cuivre (corps chaud) au calorimètre (corps froid).

4. D'après ce qui précède, la variation d'énergie interne du cuivre solide est donc :

$$\Delta U = m_2 \cdot c_2 \cdot (T_f - T_2) = Q_a + Q_b$$

$$m_2 \cdot c_2 \cdot (T_f - T_2) = -m_1 \cdot c_1 \cdot (T_f - T_1) - C_{\text{cal}} \cdot (T_f - T_1)$$

Il vient :

$$c_2 = -\frac{(m_1 \cdot c_1 + C_{\text{cal}}) \cdot (T_f - T_1)}{m_2 \cdot (T_f - T_2)}$$

$$c_2 = -\frac{(80,1 \times 4,19 + 8,5) \times (20,4 - 16,4)}{62,3 \times (20,4 - 75,0)}$$

$$c_2 \approx 0,404 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$$

5. Les sources d'erreur systématique sont dues à l'opérateur, au calorimètre (isolation thermique non parfaite, incertitude sur la valeur de C_{cal}), au thermomètre (mesures de T), à la balance (mesures de m) et à l'incertitude sur c_1 .

Pour améliorer le résultat, il faut répéter plusieurs fois la mesure (par exemple, tenir compte des mesures de tous les binômes en TP), utiliser des balances et thermomètres de précision, un calorimètre très bien isolé.

35 Centrale électronucléaire

1. Le système {centrale} échange avec l'extérieur :
 – un travail électrique W , compté négativement, car fourni à l'extérieur par la centrale;
 – un transfert thermique Q , compté positivement, car fourni à la centrale par l'extérieur (cœur du réacteur);
 – un transfert thermique Q' , compté négativement, car fourni à l'extérieur (circuit de refroidissement) par la centrale.

2. D'après la conservation de l'énergie pour ce système, l'énergie reçue par la centrale est égale à l'énergie fournie par la centrale :

$$Q = -W - Q' \text{ (puisque } W < 0 \text{ et } Q' < 0 \text{)}.$$

3. Le rendement de conversion de la centrale est le rapport de l'énergie exploitable en sortie de chaîne et de l'énergie utilisée en entrée de chaîne :

$$\rho = \frac{-W}{Q} \text{ (puisque } W < 0 \text{)}.$$

4. En combinant les deux relations précédentes, il vient :

$$Q' = -W - Q = -W + \frac{W}{\rho} = W \left(\frac{1}{\rho} - 1 \right)$$

Q' est bien négatif, car $W < 0$ et $\rho < 1$.

5. L'eau du circuit de refroidissement reçoit le transfert thermique ($-Q'$) > 0 , donc son énergie interne et sa température vont augmenter.

6. a. En 600 s, la masse d'eau qui va circuler au contact de la centrale est :

$$m = 4,2 \times 10^4 \times 600 = 2,52 \times 10^7 \text{ kg}.$$

b. Pour l'eau liquide, transfert thermique et variation de température sont liés par :

$$-Q' = m \cdot c \cdot \Delta T$$

$$\text{d'où : } \Delta T = \frac{-Q'}{m \cdot c} = -\frac{W \left(\frac{1-\rho}{\rho} \right)}{m \cdot c}$$

AN :

$$\Delta T = -\frac{5,4 \times 10^{11} \times \left(\frac{1-0,33}{0,33} \right)}{2,52 \times 10^7 \times 4,18 \times 10^3} = 10,4 \text{ K}.$$

La température de l'eau s'élève d'environ 10 °C lors du fonctionnement de la centrale.

7. L'étude montre que plus le débit de l'eau est important, moins la variation de température est élevée.

36 Moteur de Stirling

1. a. Pour le système {gaz parfait}, le nombre de moles n et la température T restent constants lors de la transformation 1 \rightarrow 2, mais le volume V et la pression P varient (voir l'équation d'état).

b. Compte tenu de ce qui précède :

$$W_{12} = \int_{V_1}^{V_2} -n \cdot R \cdot T \cdot \frac{dV}{V}$$

Puisque n , R et T ne varient pas, on peut écrire :

$$W_{12} = -n \cdot R \cdot T_C \cdot \int_{V_A}^{V_B} \frac{1}{V} \cdot dV$$

c. Par intégration :

$$W_{12} = -n \cdot R \cdot T_C \cdot \int_{V_A}^{V_B} \frac{1}{V} \cdot dV = -n \cdot R \cdot T_C \cdot [\ln V]_{V_A}^{V_B}$$

$$W_{12} = -n \cdot R \cdot T_C \cdot (\ln V_B - \ln V_A) = n \cdot R \cdot T_C \cdot \ln \left(\frac{V_B}{V_A} \right)$$

d. La variation d'énergie interne du système s'écrit :

$$\Delta U_{12} = W_{12} + Q_{12}$$

e. Lors de cette transformation, la variation de température du système est nulle, donc celle de son énergie interne aussi. Ceci entraîne :

$$Q_{12} = -W_{12} = +n \cdot R \cdot T_C \cdot \ln \left(\frac{V_B}{V_A} \right)$$

Le transfert thermique est positif, car effectivement reçu par le système.

2. Pour le système {gaz parfait}, le nombre de moles n et le volume V restent constants lors de la transformation 2 \rightarrow 3, mais la température T et la pression P varient (voir l'équation d'état).

Compte tenu de ce qui précède :

$$dV = 0, \text{ donc } W_{23} = 0.$$

Le système n'échange pas de travail avec l'extérieur. La variation d'énergie interne du système s'écrit :

$$\Delta U_{23} = W_{23} + Q_{23} = 0 + Q_{23}$$

Lors de cette transformation, la variation de température du système est ($T_f - T_c$), donc celle de son énergie interne s'écrit :

$$\Delta U_{23} = n \cdot C_V \cdot (T_f - T_c)$$

Ceci entraîne :

$$Q_{23} = \Delta U_{23} = n \cdot C_V \cdot (T_f - T_c)$$

3. La puissance est liée au travail par :

$\mathcal{P} = \frac{W \cdot N}{\Delta t}$ où N est le nombre de cycles effectués pendant la durée Δt .

L'application numérique donne :

$$\mathcal{P} = \frac{-790 \times 1080}{60} \approx -14 \text{ kW.}$$

\mathcal{P} est négative puisque cette puissance est fournie par le système à la génératrice.

4. Le rayonnement est le mode de transfert thermique mis en jeu au niveau de l'absorbeur.

Retour sur l'ouverture du chapitre

37 Double ou simple vitrage ?

1. Par lecture graphique, la température extérieure ($x = 0 \text{ mm}$) est $T_e = 3,0 \text{ °C}$ et la température intérieure ($x = 24 \text{ mm}$) est $T_i = 19,0 \text{ °C}$.

2. Le flux thermique constant au cours du temps est le même à travers les différents matériaux (verre, air) traversés :

$$\varphi = \frac{|T_{e'} - T_e|}{R_{\text{th,verre}}}$$

d'où $T_{e'} = \varphi \cdot R_{\text{th,verre}} + T_e$

$$T_{e'} = 62,2 \times 1,4 \times 10^{-3} + 3,0 = 3,1 \text{ °C.}$$

La variation de température est très faible, d'où un segment pratiquement horizontal de $x = 0 \text{ mm}$ à $x = 4,0 \text{ mm}$.

3. On utilise l'expression du flux thermique pour l'ensemble de la paroi :

$$R_{\text{th,tot}} = \frac{|T_i - T_e|}{\varphi} = \frac{19,0 - 3,0}{62,2} = 0,26 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}.$$

4. a. À nouveau, on utilise la relation définissant le flux thermique :

$$\varphi = \frac{|T_i - T_e|}{R_{\text{verre}}} = \frac{19,0 - 3,0}{8,3 \times 10^{-3}} = 1,92 \times 10^3 \text{ W.}$$

b. Avec un simple vitrage aussi épais qu'un double vitrage et de même surface, le flux thermique est $\frac{1,92 \times 10^3}{62,2} = 31$ fois plus important, donc les pertes d'énergie sont beaucoup plus grandes.

5. La paroi en verre présente un intérêt esthétique, mais une moins bonne résistance thermique.

Comprendre un énoncé

38 Thermographie et isolation

1. Le transfert thermique par rayonnement (domaine des infrarouges) permet à la caméra thermique embarquée dans l'avion de mesurer des flux thermiques.

2. Les toits sont chauffés principalement par convection grâce à l'air chaud de l'habitation.

3. On exploite la formule du flux :

$$R_{\text{th,toit}} = \frac{|T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}|}{\varphi} = \frac{|16 - (-1)|}{170 \times 10^3} = \frac{17}{17,0 \times 10^4}$$

$$R_{\text{th,toit}} = 1,0 \times 10^{-4} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}.$$

4. a. Pour ces deux parois superposées les résistances thermiques s'ajoutent :

$$R_{\text{th,toit}} = R_{\text{th,laine}} + R_{\text{th,toit}}$$

b. La résistance thermique totale doit être 200 fois plus grande que celle du toit seul. La résistance thermique de la laine est donc égale à 199 fois la résistance thermique du toit.

$$R_{\text{th,laine}} = \frac{e}{S \cdot \lambda} = R_{\text{th,tot}} - R_{\text{th,toit}} = 199 R_{\text{th,toit}}$$

$$\text{donc } e = 199 R_{\text{th,toit}} \cdot \lambda \cdot S$$

$$\text{soit } e = 199 \times 1,0 \times 10^{-4} \times 0,04 \times 100 \approx 8 \times 10^{-2} \text{ m.}$$

Pour réduire les pertes thermiques par 200, il faut poser environ 8 cm de laine de verre.

Transferts quantiques d'énergie et dualité onde-particule

Chapitre

15

Activités

1 Ondes ou particules ? Les physiciens n'y voient pas clair au début du xx^e siècle (p. 376)

1

xvii ^e siècle	NEWTON	Modèle particulaire
xviii ^e et xix ^e siècles	YOUNG, FRESNEL, MAXWELL	Modèle ondulatoire
xx ^e siècle	EINSTEIN, suite à l'expérience de HERTZ (notamment), LEWIS	Modèle particulaire quantifié
xxi ^e siècle	DE BROGLIE	Dualité onde-particule

2 a. L'effet photoélectrique s'explique par l'aspect particulaire de la lumière.

b. Les interférences s'expliquent par l'aspect ondulatoire de la lumière.

3 L'observation des résultats expérimentaux conduit à l'élaboration d'un modèle permettant de comprendre un phénomène.

De nouveaux résultats peuvent conduire, après leur validation à la modification ou à l'abandon de ce modèle. La nouvelle théorie proposée doit être compatible avec toutes les observations expérimentales faites à ce jour (et doit pouvoir les expliquer).

4 La lumière présente un aspect ondulatoire et un aspect particulaire.

5 a. L'énergie d'un photon est donnée par :

$$\mathcal{E} = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Dans cette expression, on parle d'énergie quantifiée d'un photon (aspect particulaire de la lumière) et λ est la longueur d'onde (aspect ondulatoire de la lumière).

b. Plus λ est grande, plus \mathcal{E} est petite; la formule confirme l'expression écrite en italique dans le texte.

Manuel numérique 20
Animation : Effet photoélectrique.

2 De la dualité onde-particule à l'aspect probabiliste de la mécanique quantique (p. 377)

1 Dans chacune des expériences, on utilise des fentes d'Young parallèles. La première figure d'interférences est obtenue en éclairant les fentes de façon continue avec un laser. Dans les deux autres, les fentes sont bombardées photon par photon (doc. 3) ou électron par électron (doc. 4). Les figures du document 4 sont obtenues lors de trois expériences de durées plus ou moins grandes.

2 La détection des photons, à des endroits précis, semble montrer l'aspect particulaire. L'obtention de figures d'interférences fait penser à un aspect ondulatoire.

3 L'obtention de points d'impact met en évidence l'aspect particulaire. Cependant, les électrons donnent aussi des figures d'interférences. Les électrons ont également un aspect ondulatoire.

4 a. Les électrons et les photons n'ont pas la même vitesse de propagation. Les électrons, contrairement

aux photons, possèdent une masse; c'est pour cela qu'on les nomme particules de matière.

b. Puisque le photon, contrairement à l'électron, est une particule sans masse, on ne peut pas le qualifier de « particule de matière ».

5 Les particules sont émises dans les mêmes conditions initiales mais n'atteignent pas toutes le même point. Or, des particules classiques émises dans les mêmes conditions ont la même trajectoire. Les points d'impact étant distribués sur l'écran de manière aléatoire, il n'est pas possible de prévoir le lieu d'impact d'une particule. Cependant, sur un nombre très grand, il semble possible de déterminer la probabilité d'observer l'impact d'une particule à un endroit donné de l'écran. L'aspect probabiliste des phénomènes quantiques signifie donc qu'on ne peut pas prévoir la position précise d'une particule, mais seulement sa probabilité de présence en un lieu donné.

3 Laser, outil d'investigation et transmetteur d'information (p. 378-379)

A Mesure de la distance entre deux sillons d'un CD ou d'un DVD

1 a. L'interférence observée a lieu entre les rayons issus de sillons consécutifs jouant le rôle de sources secondaires.

b. Des interférences constructives permettent d'observer une tache brillante sur l'écran.

2 a. λ , d et x sont des distances que l'on exprime avec la même unité (mètre ou sous-unités du mètre).

Le rapport $\frac{d^2}{x^2}$ et par suite $\sqrt{1 + \frac{4 \cdot d^2}{x^2}}$ sont des grandeurs sans dimension.

La grandeur $\lambda \sqrt{1 + \frac{4 \cdot d^2}{x^2}}$ s'exprime donc en mètre, tout comme la distance a ; la relation est homogène.

b. Sur la notice, on peut lire $\lambda = 532$ nm (laser vert) ou $\lambda = 650$ nm (diode laser).

Exemples de mesures obtenues :

► Pour un CD 625 traits/mm (1,60 μm):

– Mesure avec un laser vert $\lambda = 532$ nm, $d = 36$ cm et $x = 27$ cm.

On obtient $a = 1,5151$ μm .

– Mesure avec une diode laser $\lambda = 650$ nm, $d = 25,2$ cm et $x = 23,5$ cm.

On obtient $a = 1,5381$ μm .

► Pour un DVD 1350 traits/mm (0,74 μm):

– Mesure diode laser $\lambda = 650$ nm, $d = 6,9$ cm et $x = 24,5$ cm.

On obtient $a = 0,74602$ μm .

3 a. Il existe une incertitude de mesure sur la longueur d'onde du laser (de l'ordre de 1,5 pm), sur la distance d entre le disque et l'écran et sur la distance x entre les deux taches lumineuses d'ordre ± 1 .

b. $U(\lambda)$ est lue sur la notice du laser.

$$U(d) = U(x) = U_{\text{double lect}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{lect}} = \frac{2 \text{ graduations}}{\sqrt{6}} = 8,165 \times 10^{-4} \text{ m}$$

soit environ 1 mm (en prenant 1 graduation = 1 mm pour le banc optique et pour le régle) et un niveau de confiance de 95 %.

c. Compte tenu des ordres de grandeur, il est raisonnable de négliger l'incertitude sur la longueur d'onde devant les autres incertitudes.

Pour le CD et le laser vert, $U(a) \approx 0,01$ μm .

Pour le CD et le laser rouge, $U(a) \approx 0,01$ μm .

Pour le DVD et le laser rouge, $U(a) \approx 0,003$ $\mu\text{m} = 3$ nm.

d. Compte tenu de ce qui précède :

Pour le CD et le laser vert, $a = (1,52 \pm 0,01)$ μm .

Pour le CD et le laser rouge, $a = (1,54 \pm 0,01)$ μm .

On note que les deux résultats de mesure de la distance a entre deux sillons consécutifs sont compatibles.

Pour le DVD et le laser rouge, $a = (746 \pm 3)$ nm.

e. Pour améliorer la mesure, on peut la répéter plusieurs fois (ou regrouper les mesures des différents binômes du groupe, voire des classes) ou allonger autant que possible la distance disque-écran (ce qui augmente aussi x) dans le but de diminuer l'incertitude relative sur ces deux longueurs.

4 La distance entre deux sillons consécutifs dans un DVD est environ deux fois plus petite que celle dans un CD (ceci permet une augmentation de la capacité de stockage, voir chapitre 21).

Manuel numérique
Animation :
Fonctionnement
et applications
du laser.

B Utilisation d'un laser pour transmettre une information à distance

5 a. Lorsque le phototransistor est éclairé, la tension aux bornes du conducteur ohmique n'est pas nulle.

b. Lorsque le phototransistor est dans l'obscurité, la tension aux bornes du conducteur ohmique est nulle.

6 D'après le document 8, pour le signal émis, $6T = 8,70$ ms, soit $T = 1,45$ ms et $f \approx 690$ Hz.

Pour le signal reçu, $6T' = 8,80$ ms, soit $T' = 1,47$ ms et $f' \approx 682$ Hz.

La transmission-réception n'affecte que très peu la période et la fréquence du signal.

7 Le phototransistor doit être placé dans l'axe du laser pour être éclairé par celui-ci. Cette observation illustre le caractère directif du faisceau laser.

8 L'information a été transmise, entre les montages émetteur et récepteur, sous forme d'ondes électromagnétiques. Puisque de telles ondes peuvent se propager dans l'air et dans le vide, la transmission ne nécessite pas de support matériel (câbles).

4 Le microscope électronique (p. 380-381)

1 La diffraction est le phénomène limitant la résolution d'un instrument d'optique.

2 La longueur d'onde de l'onde de matière associée à un électron dans un microscope électronique est plus faible que les longueurs d'onde des radiations

appartenant au domaine du visible. Or, le pouvoir de résolution est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de l'onde utilisée dans un microscope. Celui du microscope électronique sera donc meilleur que celui d'un microscope optique.

3 D'après la relation de de Broglie appliquée à un électron non relativiste, on a $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_e \cdot v}$.

De plus, l'énergie cinétique de cet électron est $m_0 \cdot v$

$$\mathcal{E}_c = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2$$

On en déduit :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_e \sqrt{\frac{2 \cdot \mathcal{E}_c}{m_e}}} = h \sqrt{\frac{1}{2 \cdot m_e \cdot \mathcal{E}_c}}$$

L'application numérique donne :

$$\lambda = 6,63 \times 10^{-34}$$

$$\times \sqrt{\frac{1}{2 \times 9,11 \times 10^{-31} \times 10 \times 10^3 \times 1,60 \times 10^{-19}}}$$

$$\lambda = 6,63 \times 10^{-34} \times \sqrt{\frac{1}{2 \times 9,11 \times 1,60 \times 10^{-46}}}$$

$$\lambda = 6,63 \times 10^{-11} \times \sqrt{\frac{1}{2 \times 9,11 \times 1,60}} = 1,23 \times 10^{-11} \text{ m.}$$

4 Le MET possède un meilleur pouvoir de résolution que le MEB, mais ne permet d'observer qu'une coupe de l'échantillon.

Le MEB permet d'observer des surfaces, même avec un relief prononcé, contrairement au MET.

5 a. Dans ce schéma, les électrons sont représentés par de petites sphères. Cela fait penser à leur aspect particulaire. En revanche, les rayons X sont représentés sous forme de petites ondulations, ce qui met l'accent sur leur aspect ondulatoire.

b. Le terme « orbite », synonyme de trajectoire, n'est pas approprié, car, à l'échelle microscopique, on ne peut que prévoir la probabilité de présence d'un électron (les phénomènes quantiques ont un caractère probabiliste) en un lieu donné.

6 Un comportement ondulatoire, celui des atomes par exemple, peut être mis en évidence grâce à l'observation de figures d'interférences ou de diffraction. Pour observer le phénomène de diffraction, il faut qu'il existe une ouverture ou un obstacle dont les dimensions sont de l'ordre de celle de la longueur d'onde de l'onde étudiée.

D'après la relation de de Broglie, pour un atome de quantité de mouvement de valeur $M \cdot v$:

$$\lambda = \frac{h}{M \cdot v}$$

λ ne doit pas être trop petite, donc v ne doit pas être trop élevée.

7 À l'échelle macroscopique, un échantillon de matière possède une masse beaucoup trop grande pour que le caractère ondulatoire de la matière soit perceptible.

Exercices (p. 387-398)

QCM

1 1. A; 2. A et B; 3. B; 4. C; 5. A et B et C;

2 1. C; 2. A; 3. A et C; **3** 1. A; 2. C.

Application immédiate

4 Interpréter l'expérience de Davisson et Germer

La valeur de la quantité de mouvement de cet électron (non relativiste, $v \ll c$) s'exprime par :

$$p = m_e \cdot v$$

La relation de de Broglie permet de calculer la longueur d'onde de l'onde de matière associée :

$$\lambda = \frac{h}{m_e \cdot v}$$

$$\text{soit } \lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{9,11 \times 10^{-31} \times 2,4 \times 10^6} = 3,0 \times 10^{-10} \text{ m.}$$

5 Schématiser l'effet laser

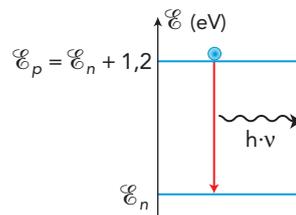
1. Ce laser émet dans le domaine des infrarouges (caractérisés dans l'air par une longueur d'onde supérieure à 800 nm).

2. L'écart énergétique se calcule par :

$$\mathcal{E}_p = \mathcal{E}_n = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,0 \times 10^8}{1,06 \times 10^{-6}} = 1,9 \times 10^{-19} \text{ J,}$$

soit environ 1,2 eV.

On en déduit le diagramme énergétique et la schématisation de l'émission stimulée :



Manuel numérique
Animation :
Fonctionnement et applications du laser.

Pour commencer

6 Connaître les aspects de la lumière

La lumière a les aspects d'onde et de particule.

7 Mettre en évidence une onde de matière

1. La diffraction caractérise l'aspect ondulatoire d'un phénomène physique.

2. L'expérience de Davisson et Germer prouve l'aspect ondulatoire d'un faisceau d'électrons.

8 Créer une onde de matière avec un électron

1. La quantité de mouvement d'une particule de masse m , non relativiste, animée d'une vitesse de valeur v a pour valeur :

$$p = m \cdot v$$

avec p en $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, m en kg et v en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

2. La relation de de Broglie s'écrit :

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

avec p en $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, h en $\text{J} \cdot \text{s}$ et λ en m .

9 Calculer la longueur d'onde d'une onde de matière

1. Pour cet électron non relativiste, la valeur de la quantité de mouvement est :

$$p = m \cdot v = 9,11 \times 10^{-31} \times 3,00 \times 10^4 \approx 9,00 \times 3,00 \times 10^{-27},$$

soit environ $2,7 \times 10^{-26} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

2. D'après la relation de de Broglie, on a :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{2,7 \times 10^{-26}} \approx \frac{6,6}{3} \times 10^{-8} = 2,2 \times 10^{-8} \text{ m}.$$

10 Connaître l'aspect probabiliste

1. D'après la figure 1, il est impossible de prévoir le lieu de l'impact du photon sur la cellule photosensible ; les impacts sont répartis aléatoirement sur l'écran.

2. L'impact d'un photon a plus de chance de se produire sur des bandes verticales parallèles aux fentes.

3. Cette expérience illustre l'aspect probabiliste des phénomènes quantiques.

11 Utiliser un diagramme énergétique

1. \mathcal{E}_n et \mathcal{E}_p représentent les énergies de deux niveaux d'énergie d'une entité (atome, ion ou molécule).

2. La flèche rouge indique que l'entité passe d'un niveau d'énergie à un autre niveau d'énergie. Elle représente une transition énergétique. Dans le cas du document, l'entité passe d'un niveau supérieur vers un niveau d'énergie plus faible.

3. Lors de cette transition du niveau d'énergie \mathcal{E}_p vers le niveau d'énergie \mathcal{E}_n , un photon, représenté par la flèche noire, est émis (émission spontanée).

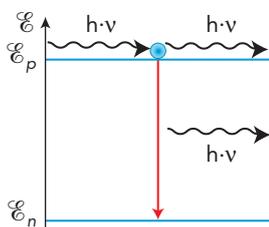
4. a. $h \cdot \nu$ représente l'énergie quantifiée du photon émis.

b. La relation est $\mathcal{E}_p - \mathcal{E}_n = h \cdot \nu$.

12 Décrire une émission stimulée

1. On parle d'émission stimulée lorsqu'une entité, dans un état excité, émet un photon d'énergie \mathcal{E} sous l'action d'un photon incident de même énergie \mathcal{E} (les deux photons ont mêmes énergie, direction, sens de propagation et ils sont en phase).

2.



13 Connaître quelques propriétés d'un laser

Un laser est une source *monochromatique*, *cohérente* dont l'énergie est concentrée dans l'espace et dans le temps. Ce type de source émet un faisceau peu divergent.

14 Associer transition et radiation

1. On peut citer les transitions entre niveaux d'énergie électronique et les transitions entre niveaux d'énergie de vibration.

2. Si la radiation se situe dans l'infrarouge, une transition entre niveaux d'énergie de vibration lui est associée.

15 Étudier une transition

1. a. L'énergie du photon a pour expression :

$$\mathcal{E} = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

$$\text{soit } \lambda = \frac{h \cdot c}{\mathcal{E}} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{10,0 \times 1,60 \times 10^{-19}} = 1,24 \times 10^{-7} \text{ m} = 1,24 \times 10^2 \text{ nm}.$$

b. Cette radiation appartient au domaine des ultraviolets (caractérisé dans l'air par une longueur d'onde inférieure à 400 nm).

2. Il s'agit d'une transition entre niveaux d'énergie électronique.

Pour s'entraîner

16 Dualité ou non dualité

1. On utilise la relation donnant la valeur de la quantité de mouvement $p = m \cdot v$ (les valeurs de vitesse sont négligeables devant c , on se place dans le cadre de la mécanique classique) et la relation de de Broglie :

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

	p ($\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	λ (m)
Boule de bowling	51	$1,3 \times 10^{-35}$
Moustique	$1,3 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-28}$
Électron	$5,6 \times 10^{-28}$	$1,2 \times 10^{-6}$

$$1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} = \frac{1}{3,6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

2. a. D'après les longueurs d'onde calculées, l'aspect ondulatoire sera observable seulement dans le cas de l'électron. Pour les deux autres systèmes (macroscopiques), λ est trop faible : il n'existe pas d'ouvertures ou d'obstacles suffisamment petits pour diffracter ces deux systèmes.

b. La masse d'une particule ne doit pas être trop élevée pour que son caractère ondulatoire soit observable.

17 De la mécanique classique à la mécanique quantique

1. a. Dans le premier schéma, on ne représente pas de trajectoire électronique, mais la probabilité de présence de l'électron. Elle est la même dans toutes les directions

de l'espace comme le montre la géométrie sphérique, ce que confirme le texte. Cette représentation est associée au modèle quantique (aspect probabiliste d'un phénomène quantique).

b. Dans le second schéma, on représente la trajectoire de l'électron autour du noyau, comme en mécanique classique.

2. On retrouve l'aspect probabiliste dans le phénomène d'interférences, particule de matière-particule de matière, ou photon-photon.

18 Absorption ou émission

- a. Le schéma A représente une absorption.
b. Le schéma C représente une émission stimulée.
c. Le schéma B représente une émission spontanée.
- Le photon incident qui peut provoquer une émission stimulée doit avoir la même énergie que le photon émis, c'est-à-dire 2,34 eV.

Sa longueur d'onde se calcule à partir de :

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{\mathcal{E}} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{2,34 \times 1,60 \times 10^{-19}} = 5,31 \times 10^{-7} \text{ m.}$$

3. Le photon émis par émission stimulée a la même énergie, la même direction, le même sens de propagation et il est en phase avec le photon incident.

19 Laser hélium-néon

1. L'énergie du photon a pour expression :

$$\mathcal{E} = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{632,8 \times 10^{-9}} \approx \frac{10^{-34} \times 3 \times 10^8}{10^{-7}} = 3 \times 10^{-19} \text{ J}$$

soit environ 2 eV (puisque $\frac{3}{1,6} \approx 2$).

2. Le photon incident doit avoir la même énergie que le photon émis, c'est-à-dire environ 2 eV.

20 Fonctionnement du laser hélium-néon

1. a. L'excitation des atomes d'hélium se fait par apport d'énergie électrique (« décharge électrique »).
b. L'excitation des atomes de néon se fait par apport d'énergie lors des collisions entre les atomes de néon et les atomes d'hélium excités.

Ces derniers se désexcitent en cédant une partie de leur énergie aux atomes de néon.

2. L'émission stimulée est amorcée par des photons émis spontanément par des atomes de néon excités (transition (4) → (3)).

3. a. D'après le diagramme énergétique, des photons de longueur d'onde égale à 632,8 nm sont émis lors de transitions du niveau d'énergie (4) vers le niveau d'énergie (3) de l'atome de néon.

b. L'énergie du photon émis a pour expression :

$$\mathcal{E} = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{632,8 \times 10^{-9}} = 3,14 \times 10^{-19} \text{ J} = 1,96 \text{ eV.}$$

c. L'écart d'énergie $\mathcal{E}_4 - \mathcal{E}_3$ est égal au quantum d'énergie du photon émis : 1,96 eV, d'où :

$$\mathcal{E}_3 = \mathcal{E}_4 - 1,96 = 20,66 - 1,96 = 18,70 \text{ eV.}$$

Manuel numérique
Animation :
Fonctionnement et applications du laser.

21 Milieu laser solide ou gazeux

1. Lors d'une émission stimulée, un photon de fréquence appropriée stimule l'émission d'un photon (de mêmes fréquence, phase, direction et sens de propagation) par un atome préalablement excité. Il faut que l'énergie du photon incident corresponde à l'écart entre deux niveaux d'énergie de l'atome.

2. Afin d'augmenter le nombre d'émissions stimulées, il faut que la proportion d'atomes dans un état excité soit plus grande que celle des atomes dans l'état fondamental.

Remarque : il faut noter que la probabilité d'absorption des photons utiles à la stimulation des atomes excités par des atomes non excités est alors faible. C'est ce que permet de réaliser l'inversion de population.

3. a. et b.

	Laser à rubis	Laser He-Ne
Milieu laser	Le barreau de rubis contenant les ions chrome (III) Cr^{3+}	Le mélange gazeux contenant les atomes de néon
Excitation	Excitation par l'éclair lumineux (pompage optique)	Excitation des atomes de néon par collision avec des atomes d'hélium (eux-mêmes excités par décharge électrique)

4. Le rôle des feuilles d'aluminium et des miroirs est le même : amplifier le rayonnement grâce aux réflexions successives des photons.

5. D'après la relation $\mathcal{E} = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ les photons émis par le laser hélium-néon transportent plus d'énergie que ceux émis par le laser à rubis.

22 Applications des lasers

1. Un laser émet un faisceau lumineux cohérent, monochromatique, très directif, concentrant l'énergie lumineuse dans le temps et l'espace.

2. a. La *directivité* : il ne faut pas que les rayons lumineux divergent si on veut cibler précisément une zone à opérer.

b. La *monochromaticité* : un isotope est ionisé sélectivement ; pour cela, il faut utiliser un rayonnement de fréquence et de longueur d'onde uniques et bien précises.

c. La *concentration de l'énergie* : le laser permet de transférer rapidement une grande quantité d'énergie sur une surface de faibles dimensions.

d. La *directivité* : il ne faut pas que les rayons lumineux divergent si on veut qu'ils atteignent la cible (de faibles dimensions et éloignée), puis le détecteur après réflexion.

e. La *cohérence* : une figure d'interférences stable s'obtient avec des ondes émises par des sources cohérentes.

Manuel numérique
Animation :
Fonctionnement et applications du laser.

23 La télémétrie laser et la Lune

1. L'énergie d'un photon a pour expression :

$$\mathcal{E} = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 299\,792\,458}{532 \times 10^{-9}} = 3,74 \times 10^{-19} \text{ J.}$$

Une impulsion laser de 200 mJ contient donc :

$$\frac{200 \times 10^{-3}}{3,74 \times 10^{-19}} = 5,35 \times 10^{17} \text{ photons.}$$

2. Soit \mathcal{E}_e l'énergie émise par 6000 impulsions laser et \mathcal{E}_r l'énergie reçue.

$$\frac{\mathcal{E}_e}{\mathcal{E}_r} = \frac{6\,000 \times 200 \times 10^{-3}}{100 \times 3,74 \times 10^{-19}} = 3,21 \times 10^{19}.$$

L'énergie émise est de l'ordre de 10^{19} fois plus importante que l'énergie reçue !

3. On calcule la durée Δt mise par la lumière pour parcourir 1 mm, à vitesse constante de valeur c :

$$\Delta t = \frac{d}{c} = \frac{1 \times 10^{-3}}{299\,792\,458} = 3 \times 10^{-12} \text{ s.}$$

La précision du chronométrage doit être de l'ordre de 10^{-12} s, c'est-à-dire de l'ordre d'une picoseconde.

24 Leptons' family...

Traduction du texte et des questions :

« Les électrons et les muons sont des particules élémentaires de la famille des leptons (particules capables d'établir des interactions faibles, mais pas des interactions fortes). Ils sont tous deux chargés négativement, mais les muons sont environ 200 fois plus lourds que les électrons et se désintègrent spontanément avec une durée de vie moyenne de 2,2 μ s.

On donne $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ et $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

1. Rappeler ce qu'est la dualité onde-particule.

2. Par quelle relation littérale peut-elle être formulée ?

3. Quel est le rapport des longueurs d'onde des ondes de matière associées à un électron et à un muon se déplaçant avec la même valeur de vitesse ? »

1. Selon le principe de la dualité onde-particule, on peut associer une onde de longueur d'onde λ à toute particule, matérielle ou non, possédant une quantité de mouvement de valeur p .

2. Ceci se traduit par la relation de de Broglie $p = \frac{h}{\lambda}$ avec h la constante de Planck.

3. On utilise les indices e et μ respectivement pour l'électron et le muon, particules supposées non relativistes.

$$\frac{p_e}{p_\mu} = \frac{m_e \cdot v_e}{m_\mu \cdot v_\mu} = \frac{m_e}{m_\mu}$$

puisque, ici, $v_e = v_\mu$. D'autre part :

$$\frac{p_e}{p_\mu} = \frac{h}{\lambda_e} = \frac{\lambda_\mu}{h} = \frac{\lambda_\mu}{\lambda_e}$$

En identifiant, il vient :

$$\frac{\lambda_\mu}{\lambda_e} = \frac{m_e}{m_\mu} \approx \frac{1}{200}$$

et donc $\lambda_e \approx 200 \cdot \lambda_\mu$.

25 À chacun son rythme

1. De la relation de de Broglie, on obtient $\lambda = \frac{h}{p}$.

2. Pour des particules non relativistes, $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$
soit $v = \frac{h}{m \cdot \lambda}$

$$v(\beta^-) = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{9,1 \times 10^{-31} \times 2,43 \times 10^{-11}} = 3,0 \times 10^7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1};$$

$$v(\alpha) = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{7\,300 \times 9,1 \times 10^{-31} \times 1,04 \times 10^{-14}}$$

$$v(\alpha) = 9,6 \times 10^6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}.$$

3. a. Par définition, $\mathcal{E}_c = \frac{1}{2} m v^2$.

$$\mathcal{E}_c(\beta^-) = 0,5 \times 9,1 \times 10^{-31} \times (3,00 \times 10^7)^2 = 4,1 \times 10^{-16} \text{ J;}$$

$$\mathcal{E}_c(\alpha) = 0,5 \times 7\,300 \times 9,1 \times 10^{-31} \times (9,60 \times 10^6)^2$$

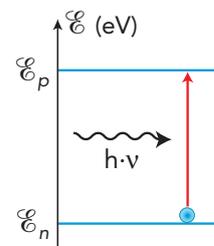
$$\mathcal{E}_c(\alpha) = 3,1 \times 10^{-13} \text{ J.}$$

On en conclut que l'énergie cinétique de la particule α est plus grande que celle de la particule β^- ; on dit qu'elle transporte plus d'énergie.

26 Les alcools en spectroscopie

1. a. Le groupe hydroxyle est le groupe O–H.

b. Lors d'une absorption, il y a gain d'énergie pour la molécule (représentée symboliquement par une sphère) :



c. Une transition d'énergie électronique est associée à une radiation UV ou visible.

d. La longueur d'onde associée au photon absorbé vérifie la relation $|\Delta \mathcal{E}| = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$, ainsi :

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{|\Delta \mathcal{E}|} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{7,02 \times 1,60 \times 10^{-19}} = 1,77 \times 10^{-7} \text{ m.}$$

Cette longueur d'onde de 177 nm appartient effectivement au domaine des ultraviolets ($\lambda < 400 \text{ nm}$).

2. a. Pour la liaison O–H, on lit $\sigma = 3\,450 \text{ cm}^{-1}$, ce qui correspond à $\lambda = 2,89 \times 10^{-4} \text{ cm} = 2,89 \mu\text{m}$.

Pour la liaison C–O, on lit $\sigma = 1\,030 \text{ cm}^{-1}$, ce qui correspond à $\lambda = 9,71 \times 10^{-4} \text{ cm} = 9,71 \mu\text{m}$.

b. Lorsqu'un photon infrarouge est absorbé par une molécule, il y a transition entre niveaux d'énergie vibrationnelle.

c. D'après la relation $|\Delta \mathcal{E}| = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$, l'écart énergétique est inversement proportionnel à λ . Il est donc plus important dans le cas de la liaison O–H que dans celui de la liaison C–O.

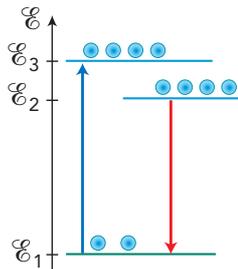
Pour aller plus loin

27 Valse laser à trois ou quatre temps

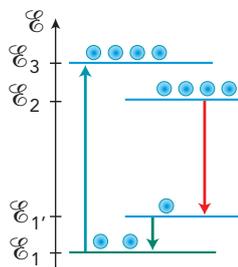
1. L'état fondamental (de plus basse énergie) est l'état (1), les états excités sont les états (2) et (3).

2. a. Le pompage optique permet de réaliser la transition (1) → (3); l'émission stimulée correspond à la transition (2) → (1).

b. On représente la transition (1) → (3) en bleu et la transition (2) → (1) en rouge :



3. et 4. Le niveau (1') est intermédiaire des niveaux (1) et (2). Il est peu peuplé. La transition laser, (2) → (1'), est représentée à nouveau en rouge. Celle maintenant l'inversion de population autrement que par pompage, (1') → (1), est représentée en vert.



5. L'excitation permettant le pompage, (1) → (3), peut se faire de manière intermittente (par impulsions), ce qui laisse du temps au système de se refroidir en cas de surchauffe.

28 Effet photoélectrique

1. À la fréquence ν , on associe l'aspect ondulatoire de la lumière.

À une valeur précise et quantifiée de l'énergie \mathcal{E} , on associe l'aspect particulaire de la lumière.

2. Avec les notations précisées, la phrase peut être traduite par la relation $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_c$.

\mathcal{E}_c désigne l'énergie cinétique de l'électron.

3. Si la fréquence de la lumière incidente, c'est-à-dire la fréquence associée aux photons qui la constituent, augmente, alors l'énergie de chaque photon $\mathcal{E} = h \cdot \nu$ augmente.

L'énergie \mathcal{E}_1 nécessaire pour arracher un électron d'un atome étant constante (d'après l'énoncé), l'énergie cinétique des électrons arrachés des atomes augmente.

4. Dans le cas du cuivre, $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1(\text{Cu}) + \mathcal{E}_c$.

Pour une vitesse de l'électron de valeur nulle, $\mathcal{E}_c = 0$. donc $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1(\text{Cu})$, soit $\frac{h \cdot c}{\lambda} = \mathcal{E}_1(\text{Cu})$

Il vient :

$$\lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{4,70 \times 1,60 \times 10^{-19}} = 2,65 \times 10^{-7} \text{ m.}$$

Un tel résultat confirme qu'un rayonnement ultraviolet (la longueur d'onde dans l'air est $\lambda < 400 \text{ nm}$) permet d'observer l'effet photoélectrique.

5. La théorie ondulatoire prévoit que des rayonnements, en augmentant leur intensité et/ou la durée d'exposition, vont apporter l'énergie nécessaire pour

arracher un électron, même si un rayonnement visible est moins énergétique qu'un rayonnement UV. Le résultat expérimental ne le confirme pas.

29 Le laser brûleur devient refroidisseur

1. Le quantum d'énergie d'un photon s'exprime par :

$$\mathcal{E} = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Il est inversement proportionnel à la longueur d'onde de l'onde associée au photon.

Plus \mathcal{E} est élevée, plus la longueur d'onde est faible.

En partant d'une radiation IR ou visible, la couleur tend vers le violet, voire l'ultraviolet.

2. a. Pour que le photon soit « au goût » de l'atome, sa longueur d'onde doit vérifier :

$h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} = |\mathcal{E}_p - \mathcal{E}_n|$ avec \mathcal{E}_p et \mathcal{E}_n les énergies des niveaux d'énergie de l'atome.

b. Il s'agit de la propriété de monochromaticité.

c. Les six lasers doivent atteindre l'atome cible. Cela est possible grâce à la directivité d'un faisceau laser.

3. L'aspect ondulatoire de la lumière est mis en évidence par l'observation de figures d'interférences ou de diffraction.

L'aspect particulaire de la lumière est mis en évidence par la quantification de l'énergie ou par l'observation de l'effet photoélectrique.

4. a. D'après la question 1, l'énergie de ces photons est :

$$\mathcal{E} = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{589 \times 10^{-9}} = 3,38 \times 10^{-19} \text{ J,}$$

soit 2,11 eV.

Cette énergie correspond à l'écart énergétique entre l'état fondamental de l'atome de sodium et le premier état excité. Un tel photon peut être absorbé par cet atome. Ces photons sont donc « au goût de l'atome ».

Après absorption, l'énergie de l'atome est :

$$\mathcal{E}_2 = -3,03 \text{ eV.}$$

b. h s'exprime en $\text{J} \cdot \text{s}$, c'est-à-dire en $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (d'après la relation de de Broglie $p = m \cdot v = \frac{h}{\lambda}$), λ en m et m en kg .

Ainsi, $\frac{h}{\lambda \cdot m}$ s'exprime en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, cette expression a la dimension d'une vitesse.

c. Le nombre N de chocs identiques que doit subir l'atome se calcule en divisant la valeur de la vitesse initiale par la quantité $\frac{h}{\lambda \cdot m}$:

$$N = \frac{v \cdot \lambda \cdot m}{h} = \frac{3,0 \times 10^3 \times 589 \times 10^{-9} \times 3,82 \times 10^{-26}}{6,63 \times 10^{-34}}$$

$$N \approx 1,0 \times 10^5.$$

L'atome devra subir environ 100 000 collisions pour être stoppé.

d. Un photon émis par un laser bleu (488 nm) transporte un quantum d'énergie :

$$\mathcal{E}' = \frac{h \cdot c}{\lambda'} = 2,55 \text{ eV.}$$

Cette valeur ne correspond à aucun écart énergétique pouvant être lu sur le diagramme énergétique de l'atome de sodium. Un tel photon ne pourra pas être absorbé par l'atome de sodium, il n'est pas « au goût de l'atome ».

Retour sur l'ouverture du chapitre

30 Un scalpel hors normes

1. Le faisceau laser doit être directif et concentrer beaucoup d'énergie.
2. Ce laser émet des ondes électromagnétiques dans le domaine des infrarouges, car sa longueur d'onde de 1060 nm dans l'air est supérieure à 800 nm, ce qui correspond à la limite supérieure du domaine du visible (rouge).

3. L'énergie libérée lors d'une impulsion est faible, elle a pour valeur $\mathcal{E} = 1,0 \mu\text{J} = 1,0 \times 10^{-6} \text{ J}$.

Cette énergie est libérée pendant une courte durée $\Delta t = 500 \text{ fs}$, soit $500 \times 10^{-15} \text{ s}$.

La puissance est reliée à l'énergie par l'expression :

$$P = \frac{\mathcal{E}}{\Delta t} = \frac{1,0 \times 10^{-6}}{500 \times 10^{-15}} = 2,0 \times 10^6 \text{ W}.$$

La puissance d'une impulsion est très importante alors que son énergie est faible.

4. a. L'énergie \mathcal{E} d'un photon a pour expression $\mathcal{E}_{\text{photon}} = h \cdot \nu$.

h est la constante de Planck, ν est la fréquence de l'onde électromagnétique associée au photon.

b. Le nombre de photons émis par impulsion est donc :

$$\frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_{\text{photon}}} = \frac{\mathcal{E}}{h \cdot \nu} = \frac{1,0 \times 10^{-6}}{6,63 \times 10^{-34} \times 1,060 \times 10^{-6}} = 1,4 \times 10^{33}.$$

Comprendre un énoncé

31 Le microscope électronique

1. Le phénomène de diffraction est associé à l'aspect ondulatoire de la lumière.

2. Il faut utiliser des radiations électromagnétiques visibles ayant la plus petite longueur d'onde possible, soit des radiations violettes de 400 nm de longueur d'onde dans l'air.

3. a. La relation de de Broglie s'écrit : $p = \frac{h}{\lambda}$.

b. Lorsque $v \ll c$, la valeur de la quantité de mouvement d'une particule matérielle s'exprime par $p = m \cdot v$.

c. D'après ce qui précède :

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{9,11 \times 10^{-31} \times 1,0 \times 10^7} = 7,3 \times 10^{-11} \text{ m},$$

soit $7,3 \times 10^{-2} \text{ nm}$.

Les radiations visibles ont des longueurs d'onde comprises entre 400 nm et 800 nm dans l'air. Les longueurs d'onde des ondes de matière associées à ces électrons sont bien inférieures à celles de la lumière visible.

4. La taille d'un atome est de l'ordre de 10^{-10} nm . Les ordres de grandeur de la taille de l'atome et de la longueur d'onde de l'onde associée aux électrons sont comparables. Il sera donc possible d'observer des atomes avec ce type de microscope comme le montre la photographie.

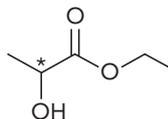
Exercices Bac

1 Le lactate d'éthyle (p. 400-401)

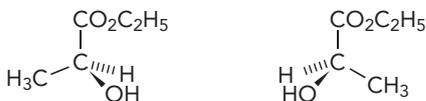
A. 1. Le lactate d'éthyle, produit naturel présent dans des produits alimentaires, est déjà utilisé comme additif alimentaire. Le lactate d'éthyle étant un liquide soluble dans l'eau et dans de nombreux solvants organiques, il va pouvoir être utilisé, seul ou mélangé à d'autres solvants, pour dissoudre de nombreuses espèces organiques. Ainsi, il est actuellement utilisé pour décaper des pièces peintes, nettoyer des presses d'imprimerie, dégraisser des pièces métalliques ainsi que lors de la fabrication de semi-conducteurs. Peu volatil, il dégage peu de vapeurs et ces vapeurs ont peu d'effet sur les utilisateurs et l'environnement : c'est donc un solvant de remplacement pour des solvants toxiques. C'est un produit combustible, mais comme il est peu volatil, il est moins inflammable que d'autres solvants plus facilement inflammables. Le lactate d'éthyle est donc un solvant alternatif qui permet de travailler dans des conditions opératoires plus sûres.

2. Le lactate d'éthyle est un ester hydroxylé, car sa structure présente un groupe ester et un groupe hydroxyle.

3. a. Le lactate d'éthyle est chiral, car il possède un atome de carbone asymétrique : l'atome de carbone qui porte le groupe hydroxyle.



b. Représentation des stéréoisomères de configuration du lactate d'éthyle :



Images l'un de l'autre dans un miroir plan et non superposables, ils sont énantiomères.

4. Un mélange racémique est un mélange équimolaire de deux énantiomères.

Un seul des énantiomères de l'acide lactique est obtenu par fermentation. Comme la réaction d'estérification ne met pas en jeu l'atome de carbone asymétrique de l'acide lactique, un seul des deux énantiomères du lactate d'éthyle est alors obtenu.

B. 1. Influence du pH :

a. Le pH de la solution dans le fermenteur doit être contrôlé pour maintenir un pH de l'ordre de 5 et permettre l'action des bactéries *Lactobacillus*.

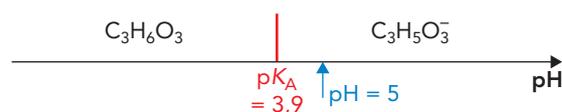
b. $\text{pH} = \text{p}K_A + \log\left(\frac{[\text{A}^-]}{[\text{AH}]}\right)$
 $= 3,9 + \log\left(\frac{[\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3^-]}{[\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3]}\right)$

Pour $\text{pH} = 5$, $\text{pH} > \text{p}K_A$

et $\log\left(\frac{[\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3^-]}{[\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3]}\right) > 0$,

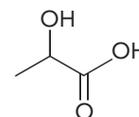
soit : $[\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3^-] > [\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3]$.

C'est donc l'ion lactate qui prédomine à $\text{pH} = 5$.



2. a. Les groupes caractéristiques de l'acide 2-hydroxypropanoïque sont le groupe carboxyle et le groupe hydroxyle.

b. La chaîne carbonée comporte trois atomes de carbone avec un groupe carboxyle à une des extrémités (atome de carbone n° 1) et un groupe hydroxyle sur l'atome de carbone n° 2.



C. 1. La réaction de synthèse du lactate d'éthyle est une réaction de substitution.

2. $n_1 = \frac{m_1}{M(\text{ol})} = \frac{1,30 \times 10^4 \times 10^3}{46,0} = 2,83 \times 10^5 \text{ mol}$

$n_2 = \frac{m_2}{M(\text{acide})} = \frac{8,50 \times 10^3 \times 10^3}{90,0} = 9,44 \times 10^4 \text{ mol}$

$n_2 < n_1$, l'acide lactique est donc le réactif limitant.

$n(\text{LE}) = \frac{m}{M(\text{LE})} = \frac{1,06 \times 10^4 \times 10^3}{118,0} = 8,98 \times 10^4 \text{ mol}$

Le rendement de la synthèse est donc :

$\rho = \frac{n(\text{LE})}{n_2} = \frac{8,98 \times 10^4}{9,44 \times 10^4} = 0,951$, soit 95 %.

3. Le spectre IR montre que la réaction a bien eu lieu. En effet, la bande d'absorption de la liaison $\text{C}=\text{O}$ est située vers 1740 cm^{-1} , ce qui est conforme à la valeur attendue pour la liaison $\text{C}=\text{O}$ d'un ester et supérieur aux valeurs envisageables pour la liaison $\text{C}=\text{O}$ d'un acide carboxylique.

On peut, de plus, noter que la bande d'absorption de la liaison $\text{O}-\text{H}$, vers 3500 cm^{-1} , est nettement moins étendue que la bande d'absorption de la liaison OH d'un acide carboxylique.

4. a. L'étape 2 est une réaction d'addition, alors que l'étape 4 est une réaction d'élimination.

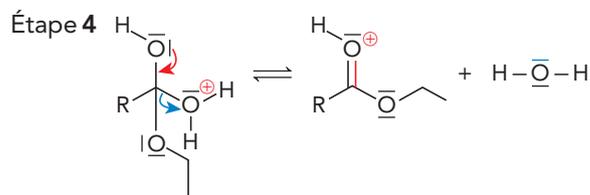
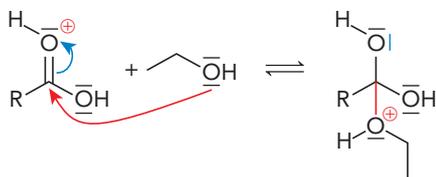
b. Dans l'étape 2, le site donneur de doublet d'électrons mis en jeu est l'atome d'oxygène de l'éthanol, qui possède deux doublets non liants; le site accepteur de doublet d'électrons mis en jeu est l'atome de carbone du second réactif qui est lié à deux atomes d'oxygène, atomes plus électronégatifs que lui.

Dans l'étape 4, le site donneur de doublet d'électrons mis en jeu est l'atome d'oxygène du groupe

hydroxyle du réactif, car il possède deux doublets non liants; le site accepteur de doublet d'électrons mis en jeu est l'atome de carbone qui est lié à trois atomes d'oxygène, atomes plus électronégatifs que lui.

La formation de la double liaison implique la rupture de la liaison C–O, puisqu'un atome de carbone doit respecter la règle de l'octet et l'obtention de la molécule d'eau.

c. Étape 2



5. Lors de l'estérification, le milieu acide assure la présence d'ions hydrogène H^+ , qui interviennent dans certaines étapes du mécanisme réactionnel sans intervenir dans le bilan de l'estérification : les ions hydrogène sont donc des catalyseurs de cette réaction.

2 Refroidissement d'atomes par laser (p. 402-403)

1. a. Le refroidissement de molécules d'eau chaude par de l'eau froide est dû à des collisions. Les molécules d'eau chaude, plus agitées que celles de l'eau froide, leur communiquent de l'agitation tandis qu'elles sont ralenties à chaque collision. Le système évolue ainsi jusqu'à ce que toutes les molécules aient la même énergie cinétique moyenne, donc la même température. Le corps le plus froid s'est réchauffé, mais le plus chaud s'est refroidi : il y a eu échange d'énergie thermique contrairement à ce qui se passe lors du processus de refroidissement des atomes par les photons. Il y a cependant, dans les deux cas, transfert de quantité de mouvement (entre molécules d'eau, d'une part, et entre un atome et un photon, d'autre part).

b. On ne peut pas atteindre le zéro absolu avec la technique de refroidissement des atomes par laser, car il est impossible d'immobiliser complètement les atomes. La désexcitation spontanée (par émission de photon) de l'atome fait qu'il subit un effet de recul dans une direction aléatoire. Il est donc toujours en mouvement. Or, le zéro absolu correspond à l'absence totale de mouvement.

2. a. Un photon peut être modélisé comme une particule associée aux ondes lumineuses. C'est la dualité onde-particule : la lumière peut être considérée comme l'une ou l'autre. C'est la raison pour laquelle on associe une fréquence au photon : c'est la fréquence de l'onde associée.

b. D'après la relation de de Broglie, $p = \frac{h}{\lambda}$.

Or, $\lambda = \frac{c}{f}$, donc $p = \frac{h \cdot f}{c}$.

c. Par application numérique de la relation de de Broglie :

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{780 \times 10^{-9}} = 8,50 \times 10^{-28} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

d. La lumière laser est très directive, le faisceau laser permet de privilégier une direction précise. La lumière laser est aussi monochromatique; tous les photons émis par le laser ont la même longueur d'onde dans le vide.

e. Sur le schéma de l'article scientifique, c'est le laser de gauche (le n° 2), celui vers lequel se dirige l'atome, qui permet de ralentir l'atome.

3. a. Pour cet atome non relativiste ($v \ll c$), la valeur de sa quantité de mouvement s'exprime par $p = m \cdot v$, soit $p = 1,44 \times 10^{-25} \times 150 = 2,16 \times 10^{-23} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

b. L'atome est ralenti en absorbant les photons du laser vers lequel il se dirige. La longueur d'onde des photons qu'il perçoit, $\lambda_{\text{perçue}}$, doit être égale à $\lambda_0 = 780 \text{ nm}$.

Si l'atome s'approche du laser émettant des photons de fréquence, la fréquence qu'il perçoit est donnée

$$\text{par } f_{\text{perçue}} = f_{\text{émise}} \cdot \frac{\sqrt{c+v}}{\sqrt{c-v}}$$

$$\text{d'où : } f_{\text{émise}} = f_{\text{perçue}} \cdot \frac{\sqrt{c-v}}{\sqrt{c+v}}$$

$$\text{Or, } \frac{\sqrt{c-v}}{\sqrt{c+v}} < 1 \text{ donc } f_{\text{émise}} < f_{\text{perçue}}.$$

Cette information est conforme à l'article scientifique : « On utilise deux faisceaux lasers de même direction, de sens opposés et de même fréquence f fixée précisément à une valeur légèrement inférieure à la fréquence f_0 d'absorption/émission de l'atome ».

Comme $f = \frac{c}{\lambda}$, on a $\lambda_{\text{émise}} > \lambda_{\text{perçue}}$. Ainsi, $\lambda_{\text{émise}} > \lambda_0$.

c. Lorsque l'atome émet un photon, il subit un mouvement de recul, comme une arme à feu qui lance un projectile. L'atome est donc freiné.

4. a. La somme $(c+v)$ a la dimension d'une valeur de vitesse, $\frac{c+v}{c}$ est donc sans dimension.

L'expression $f_{\text{perçue}} = f_{\text{émise}} \cdot \frac{c+v}{c}$ est donc homogène.

b. En utilisant la relation simplifiée proposée :

$$f_{\text{perçue}} = f_{\text{émise}} \times \frac{3 \times 10^8 + 150}{3 \times 10^8} \approx f_{\text{émise}}$$

Si l'atome se rapproche de la source, on a, d'après le

$$\text{document 5 : } f_{\text{perçue}} = f_{\text{émise}} \cdot \frac{\sqrt{c+v}}{\sqrt{c-v}}$$

$$f_{\text{perçue}} = f_{\text{émise}} \times \sqrt{\frac{3 \times 10^8 + 150}{3 \times 10^8 - 150}} \approx f_{\text{émise}}$$

Les deux expressions conduisent au même résultat.

5. a. La valeur de la vitesse de la lumière dans le vide n'est pas donnée dans un référentiel particulier, car elle est la même dans tous les référentiels galiléens.

b. À partir de la relation $T_{\text{perçue}} = T_{\text{émise}} \cdot \gamma \cdot \left(1 - \frac{v}{c}\right)$, on déduit :

$$\begin{aligned} T_{\text{perçue}} &= T_{\text{émise}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{v}{c}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v}{c}}} \cdot \left(1 - \frac{v}{c}\right) \\ &= T_{\text{émise}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{v}{c}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v}{c}}} \cdot \left(\sqrt{1 - \frac{v}{c}}\right)^2 \\ &= T_{\text{émise}} \cdot \frac{\sqrt{1 - \frac{v}{c}}}{\sqrt{1 + \frac{v}{c}}} \end{aligned}$$

soit $T_{\text{perçue}} = T_{\text{émise}} \cdot \frac{\sqrt{c-v}}{\sqrt{c+v}}$

et $\frac{1}{f_{\text{perçue}}} = \frac{1}{f_{\text{émise}}} \cdot \frac{\sqrt{c-v}}{\sqrt{c+v}}$

$$f_{\text{perçue}} = f_{\text{émise}} \cdot \frac{\sqrt{c+v}}{\sqrt{c-v}}$$

On retrouve bien la relation du document 5 lorsqu'un atome s'approche de la source laser.

TP Bac

1 Une loi de Kepler pour « peser » Jupiter (p. 404-405)

1. a. La grandeur a représente le rayon de la trajectoire circulaire d'un satellite de Jupiter.

b. Pour accéder à la masse M de la planète, il faut mesurer la période de révolution T du satellite et le rayon a de sa trajectoire dans le référentiel jupitero-centrique.

c. Pour exprimer la masse M en kilogramme, la période de révolution doit être mesurée en seconde et le rayon de la trajectoire en mètre.

2. La configuration doit être telle que l'affichage de la trajectoire des satellites soit le plus grand possible à l'écran.

3. Pour la mesure de T , on déclenche le mouvement de façon à positionner un satellite, par exemple Io, sur un point de repère de la grille écliptique. On note t_1 la date correspondante (mesurée en jour, grâce à l'option *Date julienne*). On déclenche de nouveau le mouvement jusqu'à une révolution complète autour de la planète et on note la date t_2 . La période de révolution s'obtient par différence :

$$T = t_2 - t_1$$

Pour la mesure de a , on imprime la capture d'écran de la trajectoire des satellites.

On détermine, à partir du diamètre D de Jupiter, l'échelle de la représentation graphique obtenue.

Enfin, on mesure le diamètre de la trajectoire de Io pour en déduire sa valeur réelle.

Complément

Pour une impression économique, on pourra copier-coller la capture d'écran dans un logiciel de traitement d'images et inverser les couleurs.

Exemples de résultats obtenus consignés dans un tableau :

• Paramètres :

M_J (kg)	1,8986E+27		
D_{papier} (cm)	1,90	$D_{\text{réel}}$ (m)	142984E+03
1 jr (s)	86400		
G ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$)	6,67E-11		

• Mise en œuvre : voir le tableau en bas de page.

4. Voir le tableau en bas de page (dernière colonne). La mesure la moins précise est celle utilisant Io, proche de Jupiter.

La mesure de a est, dans ce cas, entachée d'une erreur relative plus grande que pour les deux autres satellites choisis.

Satellite	t_1 (jr)	t_2 (jr)	T (s)	a_{papier} (cm)	$a_{\text{réel}}$ (m)	M (kg)	$\frac{ M - M_J }{M_J}$
Io	2456078,145	2456079,92	153291,744	5,25	3,95E+08	1,55E+27	18,2 %
Europe	2456080,939	2456084,484	306287,136	8,93	6,72E+08	1,91E+27	0,686 %
Ganymède	2456086,647	2456093,815	619288,416	14,4	1,08E+09	1,94E+27	2,37 %

2 Emmagasinier de l'énergie thermique (p. 406-407)

1. a. La capacité thermique d'un bloc de fer de masse $m_{\text{fer}} = 120 \text{ g}$ est :

$$C_{\text{bloc}} = c_{\text{fer}} \cdot m_{\text{fer}} = 53,3 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}.$$

b. Le calorimètre utilisé lors des mesures dont les résultats sont donnés ci-dessous a une capacité thermique $C = 78,9 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$.

Complément

Cette valeur a été préalablement déterminée par la méthode des mélanges.

Une masse m_1 d'eau est mise dans un calorimètre, l'équilibre thermique est atteint pour une température θ_1 . On ajoute une masse m_2 d'eau à la température θ_2 , l'équilibre thermique est atteint pour une température θ_f .

Le bilan en énergie permet d'écrire :

$$m_1 \cdot c_{\text{eau}} \cdot (\theta_f - \theta_1) + C \cdot (\theta_f - \theta_1) + m_2 \cdot c_{\text{eau}} \cdot (\theta_f - \theta_2) = 0$$

$$\text{d'où : } C = \frac{m_2 \cdot c_{\text{eau}} \cdot (\theta_f - \theta_2)}{(\theta_1 - \theta_f)} - m_1 \cdot c_{\text{eau}}$$

On reprend l'expérience en remplaçant la deuxième masse d'eau par un bloc de fer :

	Température initiale	Température finale	Énergie échangée
Calorimètre	$\theta_i = 30 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_f = 35 \text{ }^\circ\text{C}$	$Q_1 = C \cdot (\theta_f - \theta_i)$
$m_{\text{eau}} = 30 \text{ g}$	$\theta_i = 30 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_f = 35 \text{ }^\circ\text{C}$	$Q_2 = m_{\text{eau}} \cdot c_{\text{eau}} \cdot (\theta_f - \theta_i)$
$m_{\text{fer}} = 120 \text{ g}$	$\theta' = 55 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_f = 35 \text{ }^\circ\text{C}$	$Q_3 = m_{\text{fer}} \cdot c_{\text{fer}} \cdot (\theta_f - \theta')$

c. Le bilan en énergie permet d'écrire, le système étant parfaitement calorifugé :

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0$$

On en déduit :

$$c_{\text{fer}} = \frac{(C + m_{\text{eau}} \cdot c_{\text{eau}}) \cdot (\theta_f - \theta_i)}{m_{\text{fer}} \cdot (\theta' - \theta_f)}$$

Par application numérique :

$$c_{\text{fer}} = 0,425 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}.$$

2. Un calorimètre de capacité thermique C contient une masse m_{eau} d'eau, l'ensemble est à la température θ_i .

On introduit dans le calorimètre une pierre de masse m_{pierre} et de capacité thermique massique c_{pierre} à la température θ' , température obtenue après avoir plongée la pierre dans un bain thermostaté ou après l'avoir placée dans une étuve.

Complément

On veillera à laisser la pierre suffisamment longtemps « en chauffe » pour que sa température atteigne la température du bain ou de l'étuve.

Lorsque l'équilibre thermique est atteint, l'ensemble est à la température θ_f .

Le bilan en énergie, en considérant le calorimètre idéal, permet d'écrire :

$$C \cdot (\theta_f - \theta_i) + m_{\text{eau}} \cdot c_{\text{eau}} \cdot (\theta_f - \theta_i) + m_{\text{pierre}} \cdot c_{\text{pierre}} \cdot (\theta_f - \theta') = 0$$

On déduit la valeur de la capacité thermique massique c_{pierre} de la pierre :

$$c_{\text{pierre}} = \frac{(C + m_{\text{eau}} \cdot c_{\text{eau}}) \cdot (\theta_f - \theta_i)}{m_{\text{pierre}} \cdot (\theta' - \theta_f)}$$

3. a. Les valeurs suivantes ont été relevées au cours d'une expérience :

$$C = 78,9 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1},$$

$$\theta_f = 23 \text{ }^\circ\text{C}, \quad \theta_i = 17 \text{ }^\circ\text{C}, \quad \theta' = 55 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$m_{\text{eau}} = 41 \text{ g}, \quad m_{\text{pierre}} = 49 \text{ g}.$$

Par application numérique, on trouve

$$c_{\text{pierre}} = 1,28 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, \text{ soit } 1,28 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}.$$

b. Les erreurs sont dues à :

- la non-idéalité du calorimètre;
- une erreur de pesée de la masse de la pierre;
- une erreur de lecture des différentes températures;
- une erreur dans la valeur de la capacité thermique du calorimètre.

Pour minimiser l'incertitude sur la mesure de c_{pierre} , on peut répéter les mesures, utiliser des appareils de précision, calorifuger le plus possible le calorimètre.

c. On compare la capacité thermique du sol en pierre, $C_{\text{sol,pierre}} = 4 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ à la capacité thermique du sol en bois, $C_{\text{sol,bois}} = 1 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$.

La capacité thermique du sol en pierre est plus grande; ce sol stocke mieux l'énergie thermique qu'un sol en bois.

3 Une étape dans la synthèse de l'isobornéol (p. 408-409)

Protocole complet de la synthèse :

Synthèse de l'isobornéol

Dans un ballon bicol de 100 mL muni d'un bouchon et d'un contrôle interne de température, introduire un barreau aimanté en forme d'olive.

À l'aide d'un volume $V = 15$ mL de méthanol, transvaser quantitativement dans le ballon une masse de 3,05 g de (+)-camphre, quantité pré-pesée.

Agiter doucement à température ambiante jusqu'à dissolution du camphre.

Refroidir le ballon à $0/+5^{\circ}\text{C}$ dans un bain d'eau glacée (glace + sel).

Ajouter 1,5 g de tétrahydruroborate de sodium (quantité pré-pesée) à la solution de camphre par petites portions de façon à maintenir la température du milieu réactionnel en dessous de 10°C .

À la fin de l'addition, placer un réfrigérant sur le col principal du ballon et agiter pendant 20 minutes à température ambiante.

Isolement du produit brut

Ajouter 10 mL d'eau par le haut du réfrigérant et chauffer à reflux pendant 15 minutes.

Refroidir le ballon à température ambiante dans un bain glace-eau.

Transvaser le contenu du ballon dans une ampoule à décanter contenant 70 mL d'eau glacée.

Rincer le ballon avec 30 mL d'éthoxyéthane et les ajouter au contenu de l'ampoule.

Agiter l'ampoule à décanter en dégazant fréquemment. Séparer les phases et recueillir la phase organique dans un erlenmeyer de 250 mL.

Extraire la phase aqueuse avec deux fois 20 mL d'éthoxyéthane. Réunir les phases organiques dans le même erlenmeyer. Placer la phase aqueuse dans un erlenmeyer de 250 mL.

Laver les phases organiques réunies avec 10 mL d'une solution saturée d'hydrogénocarbonate de sodium.

La phase organique est séchée avec du sulfate de magnésium anhydre.

Filtrer à l'aide d'un entonnoir et recueillir la phase organique dans un ballon sec préalablement taré.

Après avoir réalisé l'analyse par CCM (voir paragraphe suivant) du produit en solution dans l'éthoxyéthane, éliminer le solvant à l'évaporateur rotatif.

Mesurer la masse de l'ensemble {ballon + solide}.

En déduire la masse du produit récupéré.

Analyse par CCM

L'éluant est un mélange fourni de cyclohexane et d'acétate d'éthyle en proportions volumiques 80/20.

La plaque de chromatographie est recouverte de gel de silice contenant un indicateur de fluorescence.

Dans une cuve à chromatographie, propre et sèche, introduire l'éluant jusqu'à une hauteur d'environ 0,5 cm. Couvrir la cuve de son couvercle.

Trois dépôts seront réalisés (dans l'ordre indiqué) après dissolution des produits dans l'éthanol (une pointe de spatule de solide dans 2 mL d'éthanol) :

- camphre commercial;
 - isobornéol commercial;
 - produit synthétisé en solution dans l'éthoxyéthane.
- Révéler la plaque au diiode : après élution et séchage à l'air de la plaque, la déposer dans la cuve à iode mise à disposition et agiter. Attendre la révélation des produits puis entourer, sans trop tarder, les tâches observées.

Complément

La réaction peut être réalisée dans l'éthanol (au lieu du méthanol) pour des raisons de toxicité, mais cela est plus long.

La cuve à iode est un pot fermé contenant du sable et quelques cristaux de diiode. Attention : cette cuve doit être manipulée sous hotte.

La phase organique fournie aux élèves peut être simplement obtenue en dissolvant de l'isobornéol (5 % maximum) dans un mélange éthanol-éthoxyéthane (50 %-50 % en volume).

1. Voir protocole précédent, partie **Isolement du produit brut**.

2. **Protocole d'analyse par CCM :**

Introduire environ 1 cm d'éluant dans la cuve à CCM, la fermer pour qu'elle soit saturée en éluant.

Tracer la ligne de dépôt suffisamment haute (pour qu'elle soit au-dessus du niveau de l'éluant) sans gratter la silice.

Dissoudre le camphre commercial et l'isobornéol dans l'éthoxyéthane où ils sont solubles.

Déposer les deux solutions préparées ainsi que la phase organique sur la ligne de dépôts (dépôts suffisamment espacés et faire au moins trois piquages).

Introduire la plaque dans la cuve, la fermer et ne plus la bouger.

Retirer la plaque à CCM avant que l'éluant n'atteigne le bord supérieur de la plaque. Noter le front de l'éluant.

Révéler la plaque en l'introduisant dans la cuve contenant les vapeurs de diiode.

3. a. La phase organique contient bien de l'isobornéol, car une tache au niveau du dépôt 3 a le même rapport frontal que la tache au niveau du dépôt 2. La phase organique contient aussi de l'isobornéol, car la deuxième tache au niveau du dépôt 3 a le même rapport frontal que la tache au niveau du dépôt 1.

b. La bande large, vers 3400 cm^{-1} , caractéristique des alcools, n'est présente que sur le spectre B. C'est donc le spectre de l'isobornéol.

4 Déterminer la valeur d'une constante d'acidité (p. 410-411)

1. Solution mère S_0 :

- concentration : $C_0 = 2,00 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- volume à prélever : V_0 .

Solution fille S :

- concentration : $C = 2,00 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- volume à prélever : $V = 100,0 \text{ mL}$.

$$\text{Facteur de dilution : } F = \frac{C_0}{C} = \frac{2,00 \times 10^{-2}}{2,00 \times 10^{-3}} = 10,0$$

$$\text{et : } F = \frac{V}{V_0}$$

$$\text{donc : } V_0 = \frac{V}{F} = \frac{100,0}{10,0} = 10,0 \text{ mL.}$$

On prélève un volume $V_0 = 10,0 \text{ mL}$ de la solution mère S_0 avec une pipette jaugée de $10,0 \text{ mL}$ munie d'un pipeteur. On verse ce volume dans une fiole jaugée de volume $V = 100,0 \text{ mL}$.

On verse de l'eau distillée jusqu'aux trois quarts du volume de la fiole, on bouche et on agite.

On complète la fiole avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge, en finissant avec une pipette Pasteur.

On bouche la fiole, on agite pour homogénéiser la solution fille.

2. Méthode conductimétrique :

On mesure la conductivité de la solution S avec un conductimètre étalonné :

$$\sigma = 131 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1} = 131 \times 10^{-4} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}.$$

On détermine $\frac{x_f}{V}$ à partir de la relation du document « pH et conductivité » : $\sigma = \frac{x_f}{V} \cdot (\lambda_{\text{C}_6\text{H}_5\text{CO}_2^-} + \lambda_{\text{H}_3\text{O}^+}) \times 10^3$

$$\begin{aligned} \frac{x_f}{V} &= \frac{\sigma}{(\lambda_{\text{C}_6\text{H}_5\text{CO}_2^-} + \lambda_{\text{H}_3\text{O}^+}) \times 10^3} \\ &= \frac{131 \times 10^{-4}}{(3,24 \times 10^{-3} + 34,98 \times 10^{-3}) \times 10^3} \\ &= 3,43 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}. \end{aligned}$$

On reporte cette valeur dans l'expression de K_A du document « Constante d'acidité » :

$$K_A = \frac{\left(\frac{x_f}{V}\right)^2}{C - \frac{x_f}{V}} = \frac{(3,43 \times 10^{-4})^2}{2,00 \times 10^{-3} - 3,43 \times 10^{-4}} = 5,89 \times 10^{-5}$$

Méthode pH-métrique :

On mesure le pH de la solution S avec un pH-mètre étalonné : $\text{pH} = 3,46$.

On calcule la valeur de la concentration $[\text{H}_3\text{O}^+]_f$ avec la relation du document « pH et conductivité » :

$$[\text{H}_3\text{O}^+]_f = 10^{-\text{pH}}$$

$$[\text{H}_3\text{O}^+]_f = 10^{-3,46} = 3,5 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

(On ne conserve que deux chiffres significatifs pour $[\text{H}_3\text{O}^+]_f$; voir cours p. 329 du manuel.)

La formule de la dernière case du tableau d'avancement permet de calculer $\frac{x_f}{V}$:

$$\frac{x_f}{V} = [\text{H}_3\text{O}^+]_f = 3,5 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

On reporte cette valeur dans l'expression de K_A du document « Constante d'acidité » :

$$K_A = \frac{\left(\frac{x_f}{V}\right)^2}{C - \frac{x_f}{V}} = \frac{(3,5 \times 10^{-4})^2}{2,00 \times 10^{-3} - 3,5 \times 10^{-4}} = 7,4 \times 10^{-5}$$

3. Méthode conductimétrique :

$$\left| \frac{K_A - K_{A,\text{tab}}}{K_{A,\text{tab}}} \right| = \left| \frac{5,89 \times 10^{-5} - 6,3 \times 10^{-5}}{6,3 \times 10^{-5}} \right| = 0,065 = 6,5 \%$$

Méthode pH-métrique :

$$\left| \frac{K_A - K_{A,\text{tab}}}{K_{A,\text{tab}}} \right| = \left| \frac{7,4 \times 10^{-5} - 6,3 \times 10^{-5}}{6,3 \times 10^{-5}} \right| = 0,14 = 14 \%$$

Causes de l'écart en K_A et $K_{A,\text{tab}}$:

- incertitudes sur les mesures de la conductivité σ ou du pH, liées aux appareils de mesures ;
- incertitudes liées à l'étalonnage des appareils de mesure ;
- solutions qui ne sont pas à la température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$;
- incertitudes sur les concentrations des solutions S_0 et S préparées.